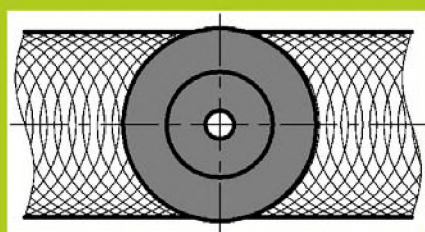
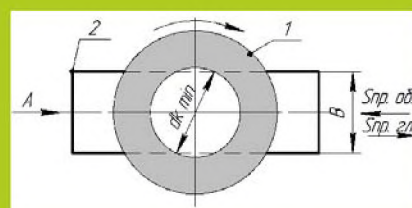
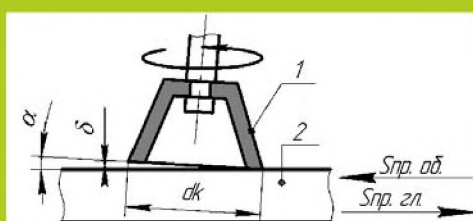


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«Харьковский политехнический институт»

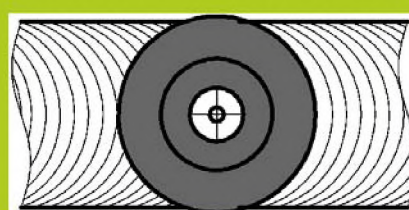
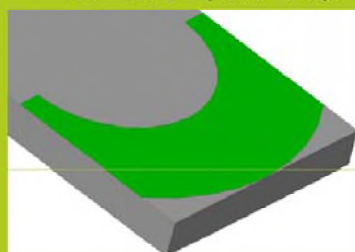
И.Н. Пыжов, В.Г. Клименко

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛОСКОГО ТОРЦЕВОГО ШЛИФОВАНИЯ

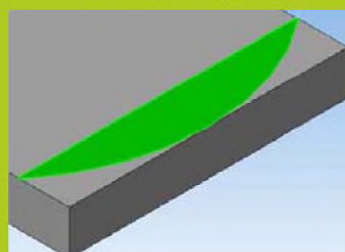
Монография



$$\alpha = \alpha_1 \quad (\alpha_1 \rightarrow 0)$$



$$\alpha = \alpha_2 \quad (\alpha_2 \gg \alpha_1)$$



Харьков  
НТУ «ХПИ»  
2019

УДК 621.923  
У 94

Рецензенты:

*Ф.В. Новиков*, д-р техн. наук, проф. ХНЭУ им. С. Кузнеця (г. Харьков)  
*А.П. Тарасюк*, д-р техн. наук, проф. первый проректор УИПА (г. Харьков)

### Решение РИС НТУ «ХПИ»

У монографії викладено сучасні підходи до вдосконалення процесу плоского торцевого шліфування за рахунок керування параметрами зони контакту круга з деталлю, які безпосередньо впливають на зниження теплонапруженості обробки.

З використанням методологій 3D моделювання розглянуто питання керування площею контакту круга з деталлю за рахунок нахилу осі обертання шпинделя, покращення умов охолодження зони обробки технологічною рідиною, створення механічних коливань у зоні обробки, правки РПКправлячими олівцями на основі синтетичного полікристалічного алмазу та запропоновані конкретні технічні рішення для їх практичного використання.

Для інженерно-технічних працівників промислових підприємств, НДІ, аспірантів та студентів машинобудівних спеціальностей вузів.

**Пыжов И.Н.**

П Совершенствование процесса плоского торцевого шлифования: монография / И.Н. Пыжов, В.Г. Клименко. – Харьков.: НТУ «ХПИ», 2019. – 157 с. – Рос. языком.

ISBN

В монографии изложены современные подходы к совершенствованию процесса плоского торцевого шлифования за счет управления параметрами зоны контакта круга с деталью, которые непосредственно влияют на снижение теплонапряженности обработки.

С использованием методологий 3D моделирования рассмотрены вопросы управления площадью контакта круга с деталью за счет наклона оси вращения шпинделя, улучшения условий охлаждения зоны обработки технологической жидкостью, создания механических колебаний в зоне обработки, правки РПКправлящими карандашами на основе синтетического поликристаллического алмаза и предложены конкретные технические решения для их практического использования.

Для инженерно-технических работников промышленных предприятий, НИИ, аспирантов и студентов машиностроительных специальностей вузов.

Ил. 54. Табл. 12. Библиогр. 182 наим.

УДК 621.923

ISBN

© Клименко В.Г., 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛОСКОГО ТОРЦЕВОГО ШЛИФОВАНИЯ.....	9
1.1. Особенности и основные схемы плоского торцевого шлифования.....	9
1.2. Снижение температуры в зоне контакта как направление повышения эффективности плоского торцевого шлифования.....	14
1.3. Анализ основных факторов, влияющих на снижение температуры в зоне контакта круга с деталью.....	15
1.3.1. Снижение температуры процесса шлифования за счет определения оптимальных режимов шлифования.....	17
1.3.2. Влияние параметров зоны контакта круга с деталью на теплонапряженность процесса плоского торцевого шлифования. Роль предварительного наклона оси шпинделя.....	17
1.3.3. Реализация процесса плоского торцевого шлифования в сплошном слое технологической жидкости.....	21
1.3.4. Правка режущей поверхности круга как фактор снижения температуры и обеспечения ее стабильности при шлифовании.....	26
1.3.5. Влияние вибраций в зоне обработки на температуру процесса шлифования.....	34
Выводы.....	35
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ЗОНЫ КОНТАКТА КРУГА С ДЕТАЛЬЮ ПУТЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАКЛОНА ОСИ ВРАЩЕНИЯ ШПИНДЕЛЯ.....	40
2.1. Исследование влияния условий обработки на длину зоны контакта режущей поверхности круга с деталью.....	40
2.2. Исследование влияния условий обработки на ширину и длину дуги и зоны контакта режущей поверхности круга с деталью.....	46
2.3. Исследование влияния условий обработки на отклонение формы плоской поверхности при шлифовании «на проход».....	55
2.4. Исследование влияния условий обработки на формирование остаточных гребешков на поверхности детали при	

многопроходной схеме торцевого шлифования.....	60
2.5. Теоретические расчеты площади контакта круга с деталью при плоском торцевом шлифовании с наклоном оси шпинделя.....	69
2.6. Практические рекомендации по применению результатов теоретических исследований на производстве.....	81
Выводы.....	87
3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРАВКИ АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ АЛМАЗНЫМИ КАРАНДАШАМИ.....	90
3.1. Определение путей повышения ресурса правящих карандашей из синтетических поликристаллических алмазов.....	90
3.2. Обеспечение высокой работоспособности алмазных карандашей из СПА на этапе их изготовления.....	92
3.2.1. Особенности оценки уровня абразивной способности синтетических поликристаллических алмазов.....	92
3.2.2. Разработка способа предварительного контроля качества синтетических поликристаллических алмазов.....	95
3.2.3. 3D-моделирование напряженно-деформированного состояния системы «СПА – металлофаза – металлическое покрытие» при изготовлении алмазного карандаша.....	99
3.2.4. Разработка способа изготовления правящего карандаша из синтетических поликристаллических алмазов.....	107
3.3. Обеспечение высокой работоспособности алмазных карандашей из СПА на этапе их эксплуатации.....	109
3.3.1. Разработка способа алмазной правки торцевых абразивных кругов на шлифовальных станках с вертикальным шпинделем.....	109
Выводы.....	111
4. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЛОСКОГО ТОРЦЕВОГО ШЛИФОВАНИЯ.....	113
4.1. Исследование и практическая реализация возможности управления процессом самозатачивания шлифовальных кругов за счет создания в зоне контакта произвольных механических колебаний.....	113
4.2. Разработка устройства для подачи технологической жидкости в зоны шлифования и правки на плоскошлифовальных станках с вертикальным шпинделем.....	118

4.3. Разработка кассетного приспособления для заточки лезвийных инструментов на плоскошлифовальных станках с вертикальным шпинделем.....	121
4.4. Разработка способа шлифования сверхтвердых материалов торцевыми кругами.....	124
4.5. Разработка конструкции плоскошлифовального станка с вертикальным шпинделем для реализации возможности управления параметрами зоны контакта РПК с деталью.....	128
Выводы.....	134
Общие выводы.....	136
Список литературы.....	138

## СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТЖ – технологическая жидкость

РПК – режущая поверхность круга

МКЭ – метод конечных элементов

НДС – напряженно-деформированное состояние

ОМ – обрабатываемый материал

СПА – синтетический поликристаллический алмаз

CVD алмаз – алмаз, полученный по технологии

Chemical Vapor Deposition

ПСТМ – поликристаллический сверхтвердый материал

$\alpha$  – угол предварительного наклона оси вращения шпинделя (град)

$W'$  – длина зоны контакта РПК с деталью (мм)

$B'$  – ширина зоны контакта РПК с деталью (мм)

$L$  – длина дуги зоны контакта РПК с деталью (мм)

$S$  – площадь зоны контакта РПК с деталью (мм<sup>2</sup>)

$S_{\text{пр}}$  – продольная подача (м/мин)

$S_{\text{поп}}$  – поперечная подача (мм/дв. х)

$S_{\text{в.}}$  – вертикальная подача (мм/дв. х)

$T$  – температура (К)

$t$  – глубина шлифования (мм)

$V_k$  – скорость круга (м/с)

$P_z$  – главная составляющая силы резания (Н)

$N$  – мощность резания (кВт)

## ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении и других отраслях промышленности значительное количество изделий имеет плоские поверхности и требует технологических операций плоского шлифования. При этом, как и ранее, важную роль продолжает играть многоместная обработка, которая позволяет существенно повысить показатели производительности и точности обработки изделий.

Традиционно в условиях производства преимущественно используется плоское шлифование периферийными кругами. Линейный характер контакта в зоне резания обуславливает высокие удельные нагрузки на абразивные зерна и тем самым способствует интенсификации процесса их самозатачивания при значительных величинах удельного расхода абразивно-алмазных материалов. Схема плоского шлифования торцевыми алмазно-абразивными кругами занимает особое место и может быть реализована на станках с вертикальным и горизонтальным шпинделем с использованием как прямоугольных, так и вращающихся столов. Например, значительное количество торцевых кругов используется и на заточных станках, которые широко применяются в промышленности. В ряде случаев плоское торцевое шлифование имеет лучшие показатели в плане шероховатости обрабатываемой поверхности, а также ее макрогеометрии.

Как известно, особенностью процессов шлифования является высокий уровень температур в зоне резания, что отрицательно сказывается на качестве обработки и требует ограничения режимов (т.е. снижение производительности) обработки. Это особенно касается плоского торцевого шлифования, которое характеризуется наибольшими значениями дуги контакта с поверхностью детали, а следовательно, и площади обработки. Это вызывает образование на шлифованных поверхностях прижогов, микротрещин, а в поверхностном слое детали – структурных преобразований и значительных остаточных напряжений растяжения, которые, как правило, являются

неблагоприятными. Для многих деталей наличие шлифовальных дефектов может быть причиной их усталостных разрушений.

По общему мнению, оптимизация плоского торцевого шлифования должна идти по пути совершенствования факторов, влияющих на снижение его теплонапряженности. На сегодняшний день существует много факторов, с помощью которых можно управлять тепловой напряженностью процесса шлифования. Это прежде всего управление площадью контакта круга с деталью за счет предварительного наклона оси вращения шпинделя, улучшение условий охлаждения зоны обработки технологической жидкостью, создание механических колебаний в зоне обработки, правка режущей поверхности круга правящими карандашами на основе синтетического поликристаллического алмаза и прочее. Но применительно к рассматриваемому процессу эти вопросы разработаны недостаточно, что в значительной мере сдерживает степень его использования. Поэтому проблема повышения эффективности процесса плоского торцевого шлифования за счет управления параметрами зоны контакта круга с деталью (то есть путем совершенствования факторов, влияющих на снижение его теплонапряженности) представляет собой актуальную научную и практическую задачу, решение которой и определило направление представленных исследований.

В настоящей работе обобщены результаты исследований, выполненных за последние десять лет в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт». Книга будет полезна инженерам-технологам, научным работникам, аспирантам, изучающим и исследующим вопросы шлифования. Работа может быть использована в учебном процессе при подготовке в высших учебных заведениях специалистов в области машиностроения.

Авторы выражают глубокую благодарность коллективу кафедры «Интегрированные технологии машиностроения» им. М.Ф. Семко НТУ «ХПИ» за создание делового, творческого климата, доброжелательность и научную принципиальность в обсуждении результатов исследований, а также лично профессору В.А. Федоровичу за участие в совместной творческой работе при использовании методологии 3D-моделирования, результаты которой использованы в монографии.



# 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПЛОСКОГО ТОРЦЕВОГО ШЛИФОВАНИЯ

## 1.1. Особенности и основные схемы плоского торцевого шлифования

Технологические операции плоского шлифования играют важную роль в машиностроении и других отраслях промышленности. Перспективность данного вида работ подтверждается тем, что в настоящее время около 20 % деталей машиностроения имеют плоские поверхности, а их значительное количество подлежит окончательной обработке на плоскошлифовальных станках [74], [165], [181]. При этом, как и ранее, важную роль продолжает играть многоместная обработка, позволяющая существенно повысить показатели производительности и точности обработки изделий.

Наиболее часто плоские поверхности деталей обрабатываются шлифованием периферийными абразивно-алмазными кругами на плоскошлифовальных станках, столы которых совершают продольные или круговые движения. Линейный характер контакта в зоне резания обуславливает высокие удельные нагрузки и тем самым способствует интенсификации процесса самозатачивания круга при значительных величинах удельного расхода абразивно-алмазных материалов. При обработке хрупких материалов это часто приводит к повышенному уровню брака из-за появления сколов, микротрещин и т. п.

Среди схем плоского шлифования особое место занимает торцевое шлифование, которое может быть реализовано на станках с горизонтальным и вертикальным расположением шпинделя с использованием также как вращательных, так и прямоугольных столов [80]. Особую группу составляют заточные станки, которые широко используются в промышленности.

Уже есть достаточное количество публикаций, подтверждающих эффективность плоского торцевого шлифования применительно к обработке хрупких материалов (например, изделий из керамики, сверхтвердых поликристаллов и т. п.) в сравнении с процессами,

основанными на использовании периферийных кругов. Среди основных преимуществ такого процесса применительно к станкам с вертикальным расположением шпинделя [2] выделим те из них, которые особенно важны для решаемых задач: уменьшение процента брака из-за скалывания и растрескивания (особенно при обработке хрупких материалов) за счет равномерного распределения давления в пятне контакта режущей поверхности круга (РПК) с заготовкой [41], [80]; возможность многоместной параллельной обработки заготовок и упрощения процесса их закрепления (например, путем использования сепараторов [114]); экологический аспект и т. д. В последнем случае имеется в виду то, что при использовании станков с вертикальным шпинделем путем применения специальных ванн есть возможность не только значительно снизить интенсивность разбрызгивания технологической жидкости (ТЖ), но и упростить реализацию мероприятий по защите работающего персонала [114]. Отметим, что понятие «технологическая жидкость» используется нами из тех соображений, что по сравнению с понятием «смазочно-охлаждающая технологическая среда» оно имеет более широкое значение, поскольку в качестве ТЖ может использоваться, например, электролит, который дополнительно выполняет функцию проводника электрического тока. Основные схемы плоского торцевого шлифования приведены на рис. 1.1 и 1.2 [32], [40], [70], [74], [78], [85], [111], [136], [164]. Плоскошлифовальные станки могут работать по принципу продольно-строгальных (рис. 1.1, *а*) или карусельных (рис. 1.1, *б* и 1.2, *а*) станков. В последнем случае в работе могут принимать участие один (рис. 1.2, *а*) или несколько шлифовальных кругов (рис. 1.2, *б*) [32], [42].

Главное движение осуществляет шлифовальный круг, который вращается со скоростью  $V_k$ . Существуют устройства для реализации планетарной схемы обработки [41], [42], [137] (рис. 1.2, *в*), а также, в некоторых случаях находят применение двусторонние станки (рис. 1.2, *г*), на которых можно одновременно обрабатывать поверхности детали сразу с обеих сторон [32], [74], [101]. Например, известная фирма JUNKER (США) выпускает шлифовальные станки, которые с высокой эффективностью реализуют такую схему плоского торцевого шлифования [153] (рис. 1.3). Этот вид обработки особенно эффективен, например, при шлифовании

тонкостенных деталей [31], поскольку позволяет реализовать принцип уравнивания сил при обработке.

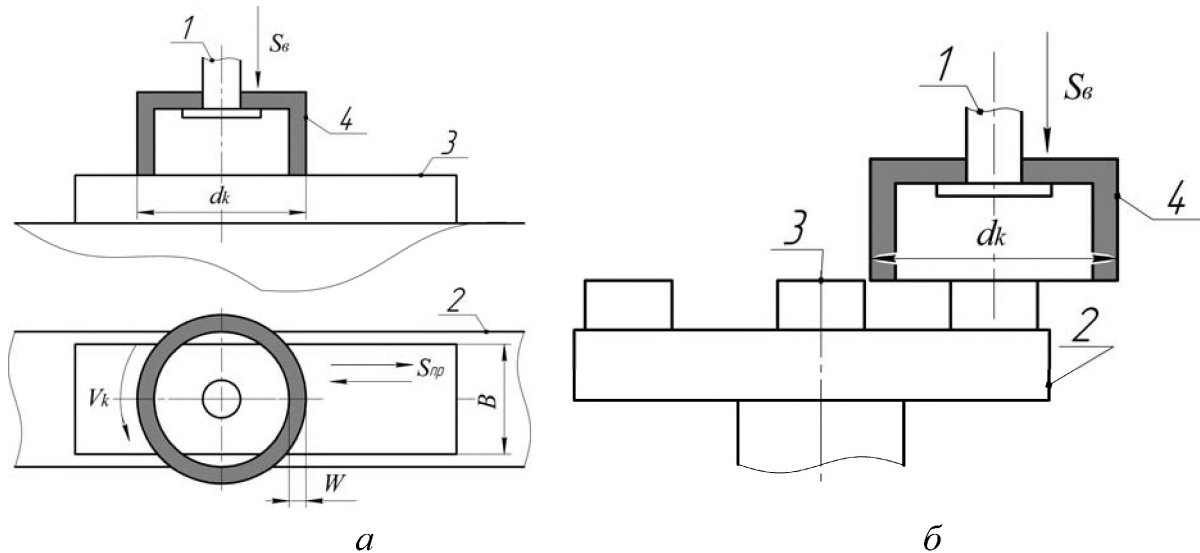


Рисунок 1.1 – Основные схемы плоского торцевого шлифования [32]:  
1 – шпиндель; 2 – стол станка; 3 – заготовка; 4 – шлифовальный круг

Процесс плоского торцевого шлифования с прямоугольным или вращающимся столами станка может быть реализован по нескольким схемам. Если диаметр круга  $d_k$  превышает ширину детали  $B$ , то наиболее эффективной схемой следует считать схему обработки «на проход».

Эта схема особенно эффективна для шлифования плоских поверхностей в условиях массового и крупносерийного типов производств. В этом случае используются два вида подач – продольная  $S_{пр}$  и вертикальная  $S_v$  (на глубину обработки). Если диаметр круга  $d_k$  меньше ширины обрабатываемой поверхности  $B$ , то используют также поперечную подачу  $S_{поп}$  в горизонтальном направлении, перпендикулярном продольной подачи  $S_{пр}$ . Эта схема обработки известна как многопроходная. Но во всех рассмотренных случаях используют вертикальную подачу  $S_v$  на глубину обработки (при использовании метода автоматического получения размеров [74] она применяется при настройке станка на размер). Такой процесс обеспечивает потенциально высокие показатели производительности и точности обработки при достаточно низких

значениях шероховатости обработанной поверхности и процента брака изделий.

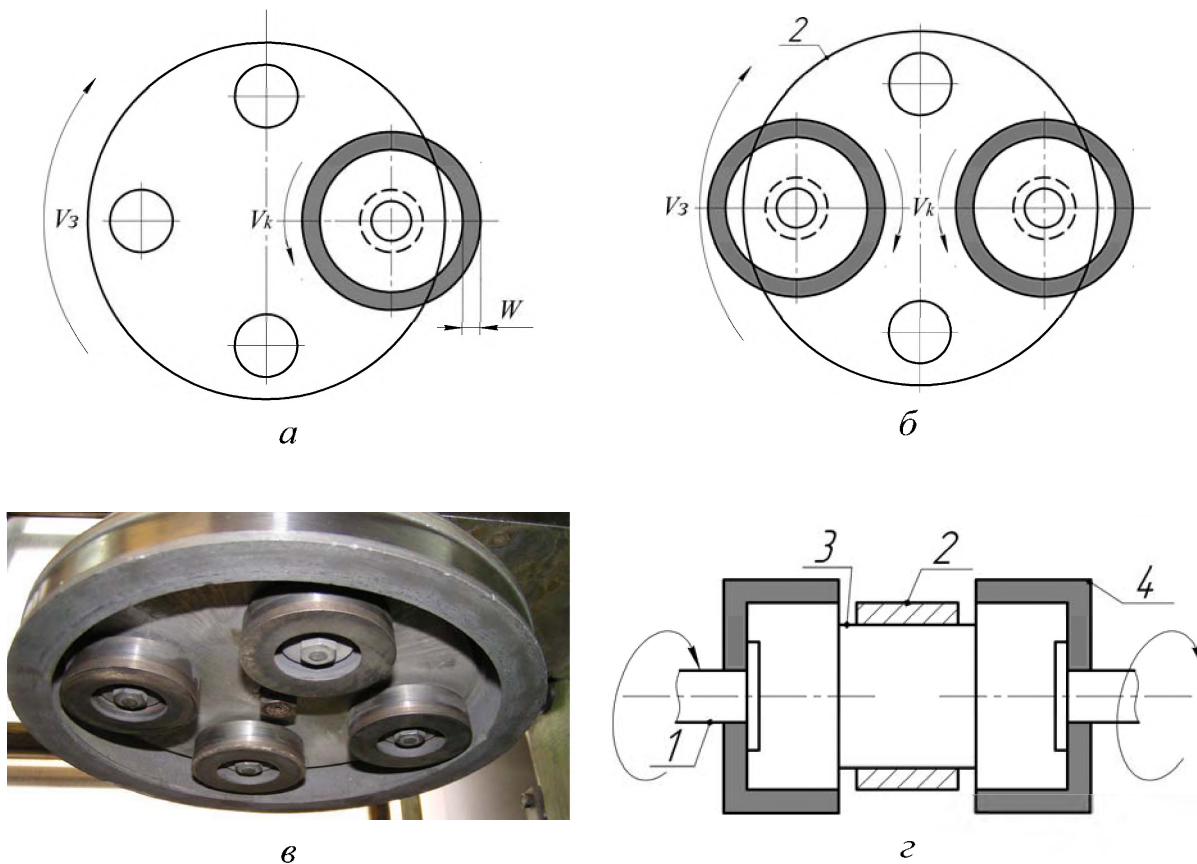


Рисунок 1.2 – Разновидности схем плоского торцевого шлифования:  
1 – шпиндель; 2 – приспособление; 3 – заготовка; 4 – шлифовальный круг.

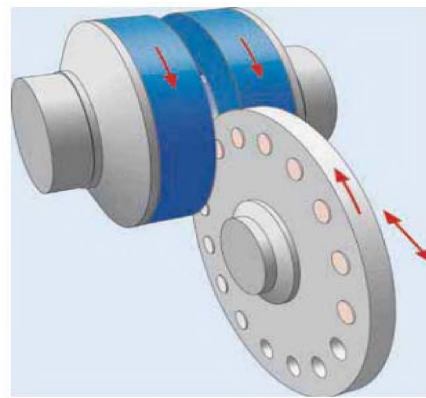
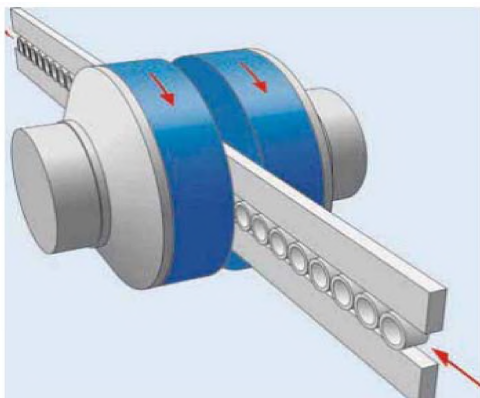


Рисунок 1.3 – Схемы процесса плоского торцевого шлифования  
сдвоенными шлифовальными кругами [153]

Однако он имеет важную особенность, которая заключается в том, что длина дуги контакта круга с деталью имеет, как правило, максимальное значение по сравнению с другими схемами обработки [68], [73], [89], [160], [173]. Это дает основания считать такой процесс шлифования наиболее теплонапряженным. Поэтому создание возможности регулирования теплонапряженности процесса шлифования [134] является достаточно перспективным подходом. Известно, что температура в зоне шлифования в локальных зонах может достигать 1100 – 1500 °С [85]. Это значительно выше температур критических точек (например, для стали 35 – это 730 °С и 810 °С). В других зонах температура может быть существенно меньше, что приводит к структурной неоднородности обрабатываемого материала и появления определенного количества фаз с различными физико-механическими свойствами. Это может проявляться в появлении прижогов, возникновении микротрещин (в случае критических внутренних напряжений), искривлении тонких заготовок и термодинамически неустойчивых фаз (например, аустенита, в том числе с большим размером зерна), которые переходят в другие фазы (например, перлит) или при дальнейшем разрушении ухудшают качество поверхностного слоя.

О тепловой напряженности процесса в зоне резания можно судить и на основании анализа состава шлама, собранного после шлифования заготовок. Шлам состоит из деформированной стружки, элементов расплавленного металла в виде шариков различной величины (рис. 1.4), абразивной пыли и других продуктов диспергирования (разрушенных зерен, связки, обрабатываемого материала (ОМ)).

Контролировать процессы, вызванные неоднородностью теплового поля, при шлифовании практически невозможно, как и измерять температуры в локальных точках в условиях быстрых термодинамических процессов. В то же время наибольший вклад в суммарную погрешность обработки вносит погрешность, вызванная именно тепловыми деформациями технологической системы [41].

Таким образом, одним из условий повышения производительности торцевого шлифования при обеспечении заданного качества обработки

является реализация путей, которые сдерживают повышение теплонапряженности в зоне контакта РПК с деталью.

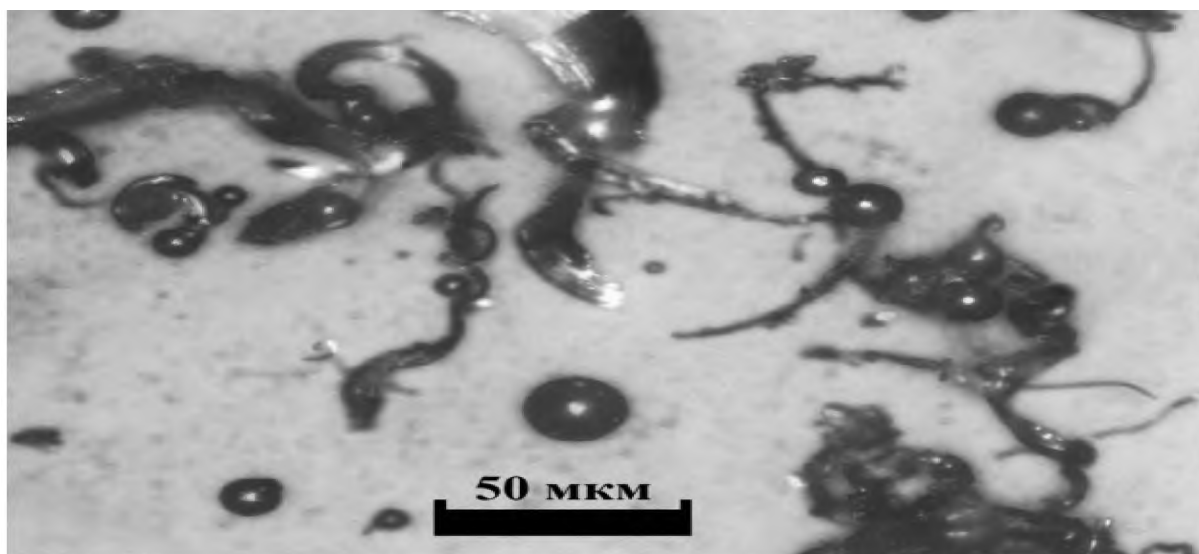


Рисунок 1.4 – Вид шлама под микроскопом (хорошо видны стружка и шарики оплавленного металла [85])

## **1.2. Снижение температуры в зоне контакта как направление повышения эффективности плоского торцевого шлифования**

В последние годы актуальность рассматриваемого вопроса возросла в связи с тем, что одной из наиболее важных задач в направлении практической реализации нанотехнологий является технология обработки наноматериалов [83]. Сегодня специалисты считают, что нанотехнологии – это абсолютно реальное направление технического прогресса, дело ближайшего будущего. Это касается и производства [10], [126], [152], [169]. Наноматериалы уже применяются в различных отраслях машиностроения. Известно, что нано- и субмикроструктурные металлы отличаются существенной нестабильностью структуры зерен. При нагревании происходят сложные структурные изменения, связанные с развитием процессов возврата, рекристаллизации, и, как следствие – рост зерна и потеря уникальных физико-механических свойств металла. Интенсивность этого процесса, приводящего к росту зерен, определяется в основном степенью и временем температурного воздействия. Поэтому в

последние годы наметилась перспективная тенденция, связанная с производством уникальных станков для высокоточной обработки наноматериалов с использованием принципа электрохимии, основным преимуществом которого является практически полное отсутствие механического или теплового воздействия на ОМ [152]. Но это совсем не исключает необходимость применения технологий резания, которые продолжают быть основными в плане получения высоких показателей размерной точности и качества обрабатываемых поверхностей. Это требует разработки специальных подходов по ограничению уровня силового и теплового воздействия на заготовку.

Рассмотренная проблема особенно актуальна для процессов шлифования [103]. К сожалению, именно они отличаются высокими показателями температуры в зоне обработки. Поэтому задача разработки и исследования низкотемпературных методов шлифования приобретает особую важность и актуальность, а оптимизация плоского торцевого шлифования должна идти по пути совершенствования факторов, влияющих на снижение его теплонапряженности [134].

Теория и практика применения процессов плоского торцевого шлифования позволила предложить достаточно эффективные меры, способствующие снижению температуры в зоне резания. Как свидетельствуют последние публикации, это возможно сделать несколькими путями. В общем, они заключаются в совершенствовании конструкций плоскошлифовальных станков за счет реализации ряда прогрессивных технических решений.

### **1.3. Анализ основных факторов, влияющих на снижение температуры в зоне контакта круга с деталью**

На теплонапряженность процесса шлифования влияет значительное количество факторов [134]. С точки зрения уменьшения степени нагрева, а значит, и деформации обрабатываемой заготовки при шлифовании (особенно с увеличенными глубинами резания) используют различные технические приемы. К ним прежде всего следует отнести следующие.

1. Использование оптимальных режимов шлифования [84], [85].

2. Уменьшение площади контакта РПК с деталью за счет предварительного наклона оси шпинделя [33], [41], [52], [53], [80].

3. Повышение эффективности процесса правки РПК алмазными инструментами [54], [134], [143], [176].

4. Создание возможности применения комбинированных процессов шлифования [43], [61], [122], [140], которые базируются, например, на использовании электрофизико-химических явлений и энергии механических колебаний (вибраций) в зонах шлифования и управления [22], [37], [64], [99], [141]. Сказанное особенно актуально при обработке хрупких материалов, например, сверхтвердых, обработка которых связана с определенными трудностями [24], [48], [122].

5. Совершенствование конструкции устройств для эффективной подачи ТЖ в зоны шлифования и правки круга [4], [6], [73], [87], [92], [93], [135], [143], [148], [149], [150], [160], [163], [175], [177], [180], [182], а также обеспечение условий для реализации на станках идеи шлифования в сплошном слое ТЖ [114].

6. Разработка методов осуществления контроля за степенью заполнения зон шлифования и правки круга ТЖ [33], [147].

7. Использование шлифовальных кругов со сплошной узкой или широкой прерывистыми [84], [151], [157], [158] рабочими поверхностями (в том числе импрегнированных кругов [134] и с пористой структурой [84], [133]).

8. Периодическое поднутрение РПК кругов и особенно с широкой рабочей поверхностью алмазными правящими инструментами.

Рассмотренные приемы являются для технолога действенным инструментом, дающим возможность решать те или иные задачи по снижению тепловой напряженности процесса шлифования. Их применение (особенно в комбинации друг с другом) может позволить существенно влиять на температуру в зоне обработки.

### *1.3.1. Снижение температуры процесса шлифования за счет определения оптимальных режимов шлифования*

Регулирование уровня тепловой напряженности в зоне шлифования путем использования более щадящих режимов [84], [85] является



традиционным приемом, который широко реализуют на практике. Для этого часто используют различные критерии оценки теплонапряженности процесса. Например, в работе [95] в качестве ограничительного критерия для определения скорости резания при лезвийной обработке с субмикро- и нанокристаллической структурами предлагается использовать размер зерна структуры металла, значение которого в значительной степени зависит от температуры обработки и времени ее действия.

Недостатком такого подхода является то, что он приводит, как правило, к уменьшению производительности обработки. Поэтому более рациональными следует считать такие приемы, которые, наоборот, за счет снижения температуры дают возможность существенно повысить производительность обработки, а следовательно, и эффективность процесса шлифования в целом.

*1.3.2. Влияние параметров зоны контакта круга с деталью на теплонапряженность процесса плоского торцевого шлифования. Роль предварительного наклона оси шпинделя*

Положительным моментом шлифования с наклоном оси шпинделя является достаточно простая возможность управления площадью зоны контакта РПК с обрабатываемой поверхностью, а значит, и термосиловой напряженностью процесса шлифования. Шпиндель шлифовальной бабки наклоняют в горизонтальной плоскости в направлении продольной подачи  $S_{пр}$  (рис. 1.5) и, таким образом, за счет уменьшения площади контакта РПК с деталью избегают чрезмерного нагрева обрабатываемой детали и достигают значительного повышения производительности обработки [68], [80], [132]. В некоторых случаях наклон круга способствует упрощению подачи ТЖ в зону шлифования [92]. На этапе чистового шлифования наклон шпинделя уменьшают, а на этапе прецизионной обработки угол наклона, как правило, должен быть равен нулю [80].

В первом случае, когда значение угла  $\alpha$  достаточно велико (от десятка минут до нескольких градусов), в контакте с поверхностью детали находится только часть РПК (с одной его стороны), при этом следы от зерен круга имеют четко выраженный вид в форме дуг, которые сдвинуты относительно друг друга в направлении продольной подачи (рис. 1.5 а, б).

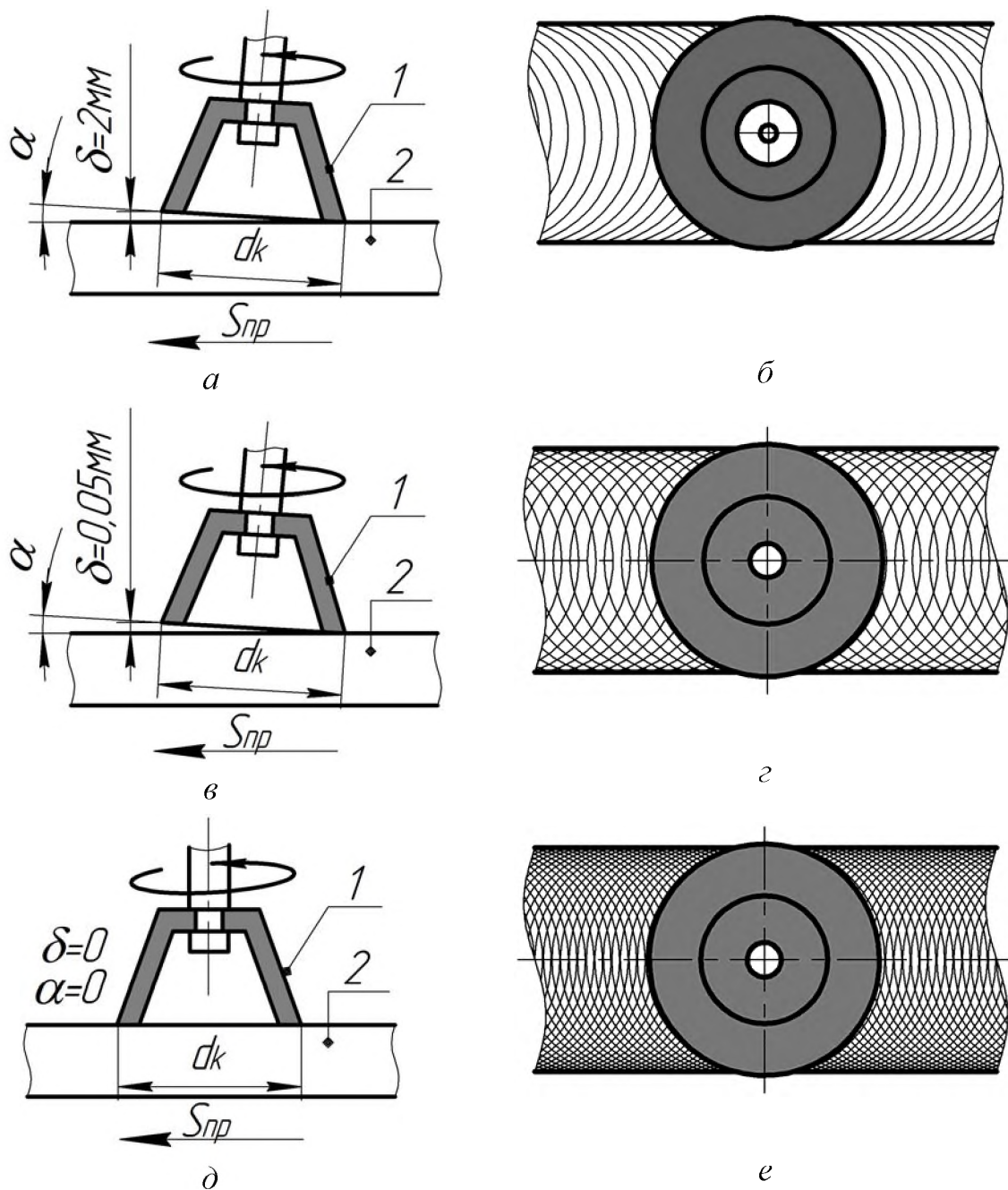


Рисунок 1.5 – К особенностям процесса плоского торцевого шлифования РПК [80]

Во втором случае, когда угол  $\alpha$  имеет небольшое значение (близкие к нулю), в контакт с поверхностью детали вступает противоположная часть РПК. При этом следы от зерен круга также имеют четко выраженный вид в форме дуг, которые сдвинуты относительно друг друга в

направлении продольной подачи, но дуги, образованные левой частью круга, имеют противоположное направление и пересекаются с дугами, образованными правой частью (рис. 1.5, в, г). В третьем случае имеем классический вариант, когда угол  $\alpha$  равен нулю и в контакте с поверхностью детали (при достаточной ее ширине) участвует вся РПК (рис. 1.5, д, е).

Но наклон оси шпинделя неизбежно ведет к повышению шероховатости и отклонению формы поверхности детали. В данном случае имеет место ее частный случай отклонения от плоскостности – вогнутость. Поэтому такая схема может применяться при незначительных требованиях к шероховатости и отклонениям формы. Обычно это предварительное (черновое), а иногда и чистовое шлифование. По мере ужесточения указанных требований величину угла  $\alpha$  надо уменьшать и при прецизионном шлифовании принимать равной нулю. Это становится возможным потому, что при чистовых и окончательных операциях шлифования используются достаточно щадящие режимы резания, в результате чего вероятность негативного влияния температурного фактора значительно уменьшается.

В подавляющем большинстве литературных источников информации величина угла  $\alpha$ , к сожалению, не приводится. Но указывается (без привязки к диаметру круга), что при предварительном шлифовании зазор между крайней точкой круга  $l$  и поверхностью детали  $2$  (см. рис. 1.5)  $\delta \leq 2$  мм, а на чистовых стадиях обработки  $\delta \leq 0,05$  мм. В то же время в работе [68] отмечается, что величина угла предварительного наклона оси шпинделя  $\alpha$  должна находиться в пределах  $2 - 4^\circ$ . Эти рекомендации делают процесс обработки не совсем определенным.

На практике процесс плоского торцевого шлифования может быть реализован как по обычной (классической), так и глубинной схемам шлифования. Эти схемы определяются по направлению продольной подачи ( $S_{пр об.}$  и  $S_{пр гл.}$ ) стола станка относительно направления угла наклона оси шпинделя  $\alpha$  (рис. 1.6, а).

Существенным недостатком обычной схемы шлифования с наклоном РПК на угол  $\alpha$  является то, что не предусматривается защита кромки круга (которая первой вступает в работу). Это обусловлено соответствующим

направлением продольной подачи  $S_{пр}$  относительно направления наклона шпинделя к кругу. В таких условиях на РПК неизбежно образуется так называемый заборный конус, необходимые параметры которого в некоторых случаях пытаются создавать искусственно [77]. На практике такой подход представляет собой достаточно сложную задачу.

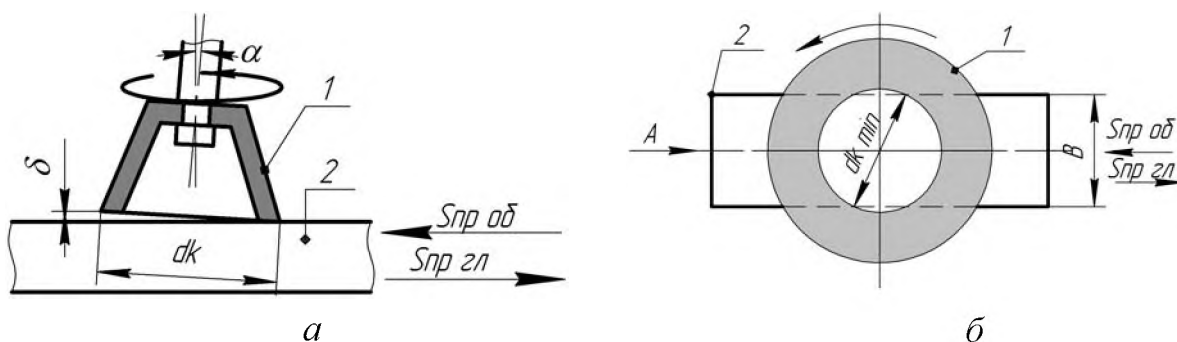


Рисунок 1.6 – Иллюстрация обычной ( $S_{пр об.}$ ) и глубинной ( $S_{пр гл.}$ ) схем шлифования с предварительным наклоном оси шпинделя:

1 – торцевой круг; 2 – деталь

В условиях предварительного наклона оси вращения шпинделя значительными технологическими возможностями в плане регулирования площади контакта РПК с деталью обладает глубинная схема обработки. При неполном контакте РПК с деталью внешняя кромка круга получает защиту от образования заборного конуса, что делает процесс шлифования более стабильным и прогнозируемым [39]. В случае шлифования «на проход» диаметр круга  $d_k$  должен превышать ширину обрабатываемой поверхности детали  $B$ . При этом желательно, чтобы и минимальный диаметр круга  $d_{k \min}$  также был больше, чем ширина  $B$  (рис. 1.6, б). Это способствует плавному входу круга в контакт с деталью и обеспечению равномерности износа РПК.

Как показал детальный анализ литературных источников, подробные исследования, касающиеся процесса шлифования с предварительным наклоном оси шпинделя, практически отсутствуют. То есть нет данных о таких параметрах, как длина дуги, ширина и площадь контакта РПК с деталью, а также величина отклонений формы (вогнутость) и остаточных

гребешков на поверхности детали. А они крайне необходимы технологам для корректного назначения условий обработки.

### *1.3.3. Реализация процесса плоского торцевого шлифования в сплошном слое технологической жидкости*

Вопросы расширения технологических возможностей процессов шлифования за счет улучшения условий охлаждения зоны резания уже достаточно полно освещены в литературе и особенно в публикациях научной школы Л. В. Худобина [147], [148], [149], [150]. Как показали труды научной школы М. Ф. Семко [122], это в полной мере касается и комбинированных процессов шлифования. Важной особенностью здесь является то, что параллельно с функцией охлаждения степень заполнения зоны шлифования ТЖ во многом определяет эффективность протекания электроэрозионных разрядов при алмазно-искровом шлифовании или электрохимических процессов в случае алмазно-электрохимической обработки. При электрохимической правке РПК токопроводящих кругов в автономной зоне важным является степень наполненности электролитом, как зоны обработки, так и зоны правки. Электролит в данном случае одновременно выполняет две функции – охлаждение зоны шлифования и обеспечение нормального протекания электролитических процессов в зоне правки РПК. Таким образом, можно подытожить, что обеспечение достаточного уровня наполненности зон шлифования и правки круга ТЖ является важным подходом, так как создает предпосылки для расширения технологических возможностей как обычных, так и комбинированных процессов шлифования.

Известно, что при шлифовании следует стремиться к использованию кругов с максимально допустимыми по условиям обработки размерами РПК [7]. Эффективное охлаждение уменьшает температуру в зоне резания, улучшает условия для удаления шлама и обеспечивает возможность использования инструмента с большей шириной рабочей поверхности. ТЖ может реализовать свои цели и функции только совместно с системой ее применения, куда входит оборудование для подачи ТЖ в зону резания и поддержания ее в течение необходимого времени в работоспособном состоянии, то есть надежности процесса охлаждения. В связи с этим

существует важное научное направление, связанное с совершенствованием технологических процессов механической обработки путем рационального применения ТЖ, которое нашло свое отражение в работах многих ученых. Достаточно сказать, что на сегодня известно несколько сотен способов подачи ТЖ в зону шлифования [41].

Охлаждающий эффект ТЖ, принудительно введенной в зону резания при шлифовании, заключается в отборе тепла, образующегося при пластической деформации и трении за счет конвективного теплообмена. Наибольшей охлаждающей способностью обладают жидкости, имеющие лучшую теплопроводность, большую удельную теплоемкость, скрытую теплоту парообразования (скорость испарения) и меньшую вязкость. Этим требованиям в значительной степени соответствует вода [66], [128], [130], [144], [148], что следует считать положительным моментом.

Известно, что коэффициент теплообмена (количество тепла, передаваемого от обрабатываемой поверхности в окружающую среду, отнесенного к разнице температур между обрабатываемой поверхностью и средой) зависит от геометрических размеров, формы и температуры поверхности теплообмена, гидродинамики, режима движения, скорости и температуры ТЖ, а также ее физических свойств [41]. В значительной степени интенсивность теплообмена зависит от скорости потока и режима течения ТЖ. Чем выше скорость течения ТЖ, тем выше значение коэффициента теплообмена. Поэтому при плоском торцевом шлифовании очень важна подача ТЖ во внутреннюю полость круга, откуда она под действием центробежных сил с высокой скоростью прокачивается через зоны шлифования и правки. При этом важно, чтобы устройства, реализующие этот способ подачи ТЖ, были как можно проще и не снижали технологические возможности процесса обработки в целом (например, хотя бы уже своим наличием).

Из известных способов подачи ТЖ при плоском торцевом шлифовании на станках с вертикальным расположением шпинделя широкое распространение получили два. Наиболее универсальным и менее эффективным из них следует считать метод полива перед фронтом шлифовального круга [11], [114]. Он применяется в основном для станков, в которых отсутствует полый шпиндель.

Вторым способом следует считать обеспечение условий для реализации на плоскошлифовальном станке с вертикальным расположением шпинделя идеи шлифования в сплошном слое ТЖ и создание возможности применения комбинированных процессов шлифования [13], [15], [17], [38], [56], [65], [90], [24], [114], [122]. Этот вопрос тесно связан с перспективой расширения технологических возможностей процессов плоского торцевого шлифования за счет интенсификации прокачки ТЖ через зоны шлифования и правки круга и, что особенно важно, дает возможность в значительной степени повысить надежность процесса охлаждения, а следовательно, реализовать идею бездефектной обработки деталей. В отличие от процесса плоского шлифования периферией круга, который требует создания сложных конструкций [139], данный процесс можно считать «идеальным» для практической реализации таких условий, например, путем использования специальных ванн (рис. 1.7) [24], [114].

Уже известны эффективные способы шлифования, позволяющие решить поставленную задачу [24], [123]. Опыт использования процесса плоского торцевого шлифования на станках с вертикальным шпинделем показывает, что для эффективной защиты от разбрызгивания ТЖ, с одной стороны, и исключения возможного перегрева детали в случае прекращения ее поступления по какой-либо причине, с другой стороны, обработку следует выполнять в специальной ванне [24], [114]. Последняя имеет соответствующие отверстия для подачи и слива ТЖ, расположенные, как правило, на разных уровнях по высоте ванны (рис. 1.7, а). Несмотря на то, что РПК и деталь находятся в сплошном слое ТЖ, эффективность охлаждения зоны шлифования все же низкая. Это объясняется тем, что воздушный поток, создаваемый кругом, препятствует попаданию ТЖ в зону обработки.

Итак, использование ванны, заполненной ТЖ, само по себе еще не решает проблемы эффективного и устойчивого охлаждения зоны шлифования. Для этого необходимо выполнение еще одного условия – создания возможности попадания ТЖ в внутреннюю полость шлифовального круга.

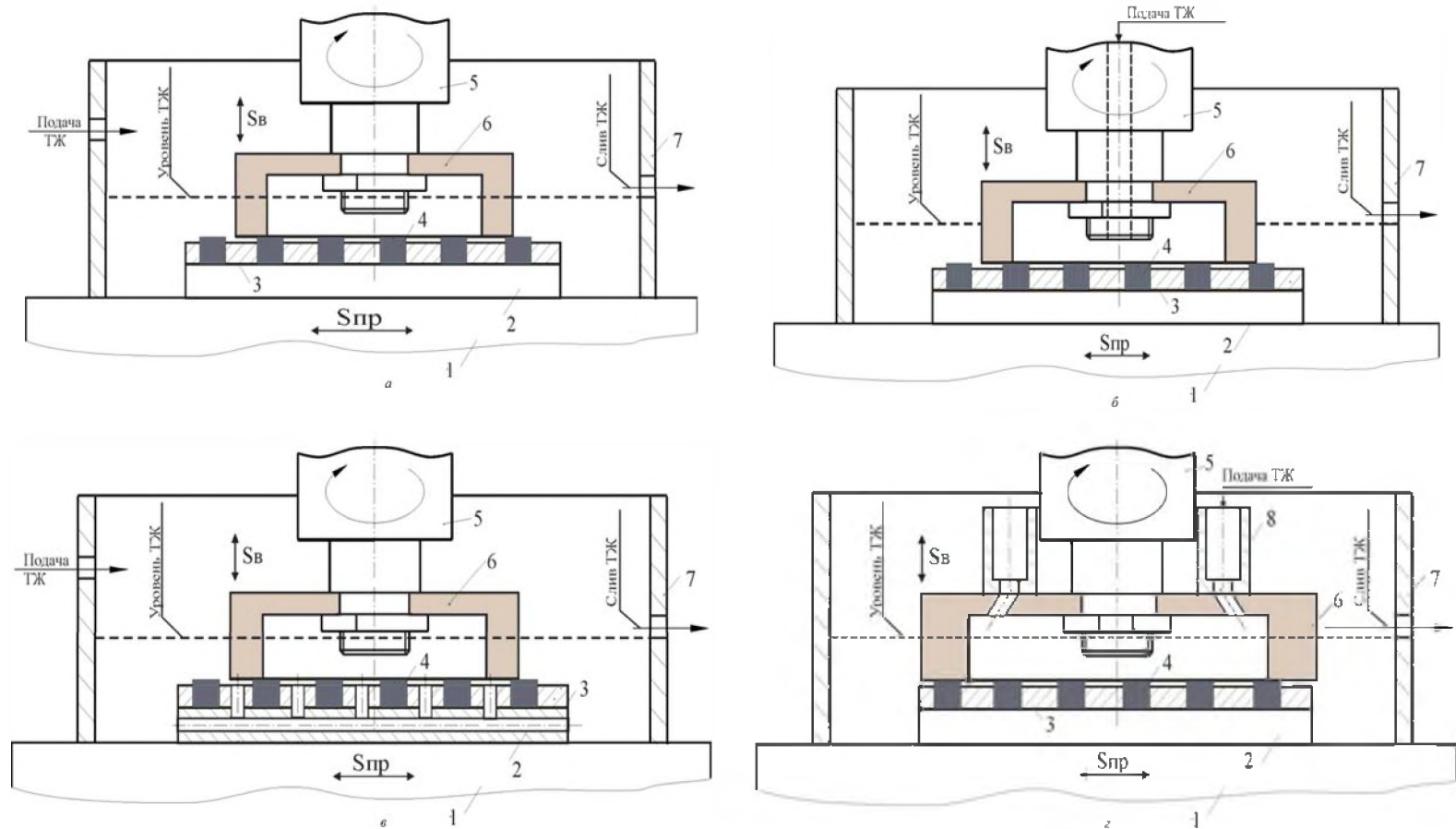


Рисунок 1.7 – Семы подачи ТЖ в зону обработки при плоском торцевом шлифовании:

*а* – непосредственно в ванну; *б* – через полый шпиндель; *в* – по методу сообщающихся сосудов; *г* – через специальный стакан;

1 – стол станка; 2 – магнитная плита; 3 – сепаратор; 4 – заготовка;

5 – шпиндель; 6 – круг; 7 – ванна; 8 – стакан



Подача ТЖ через полый шпиндель станка (рис. 1.7, б) является наиболее эффективным вариантом, поскольку ТЖ, попадая во внутреннюю полость круга, под действием центробежных сил подается в зону обработки. С силой, пропорциональной квадрату окружной скорости круга, она прокачивается через зону шлифования, создавая охлаждающий эффект и вымывающее действие [2], [148]. Кроме этого, струи воды ударяются о стенки защитного кожуха и разбиваются на мелкие брызги, благодаря чему создают вторичное охлаждающее действие. Основным недостатком этого способа следует считать существующее противоречие между интенсивностью подачи ТЖ и возможностью ее прокачки через зону обработки, а также то, что далеко не все станки имеют полую конструкцию шпинделя. Это, например, в значительной мере касается универсально-заточных станков, парк которых достаточно велик. В условиях серийного производства эти станки в результате несложной модернизации можно легко превращать в плоскошлифовальные с вертикальным расположением шпинделя. Поэтому в целях гарантированного обеспечения стабильности и эффективности охлаждения в процессе торцевого шлифования на станках с вертикальным расположением шпинделя был предложен более универсальный, простой в реализации и эффективный способ подачи ТЖ во внутреннюю полость круга, основанный на реализации известного принципа сообщающихся сосудов (рис. 1.7 в) [114].

Согласно этому способу, в ванне 7, установленной на столе 1 плоскошлифовального станка, закреплена специальная плита 2. Она имеет систему пазов (отверстий), с которыми сообщаются отверстия, выполненные в сепараторе 3, в котором в свою очередь размещены обрабатываемые детали 4. Для улучшения условий прокачки ТЖ через зону шлифования во внутренней полости круга может быть дополнительно установлена специальная крыльчатка, которая вращается вместе с ним. Процесс подачи ТЖ в зону резания осуществляется следующим образом. В ванну постоянно нагнетается ТЖ до определенного уровня, который обеспечивается расположением сливного отверстия по высоте ванны. Эта ТЖ из ванны через пазы и отверстия в плите попадает во внутреннюю полость круга по принципу сообщающихся сосудов, а затем увлекается

крыльчаткой и (или) кругом и направляется в зону резания, откуда снова возвращается в общую полость ванны. Поскольку круг находится в слое ТЖ, то разбрызгивание последней сводится к минимуму. В случае непредвиденного прекращения подачи ТЖ процесс охлаждения может продолжаться достаточно длительное время за счет того количества ТЖ, которая находится в ванне. Это гарантированно исключает брак изделий из-за возможного негативного действия температурного фактора. Возможным и более сложным вариантом является также подача ТЖ под давлением (например, из водопроводной сети с помощью специальной насадки [2]). На рис. 1.7, *г* приведен способ подачи ТЖ во внутреннюю полость круга через пазы (отверстия) в его торце с помощью специального стакана [4]. Недостатком устройства является то, что для его реализации требуются специальные круги с пазами на базовом торце, а также необходимость сборки устройства каждый раз при замене круга. Кроме этого, наличие пазов увеличивает опасность ослабления прочности круга (особенно для кругов с неметаллическим корпусом), что является дополнительным ограничивающим фактором при назначении высокопроизводительных режимов обработки. Все это в целом снижает технологические возможности процесса шлифования, но сам рассмотренный технический подход является наиболее универсальным, простым в использовании и заслуживает внимания и совершенствования.

Опыт использования процесса шлифования в сплошном слое ТЖ показывает, что наличие в ванне абразивного шлама может положительно влиять на процесс обработки на предварительных стадиях шлифования. В то же время это может негативно влиять на качество обработки при чистовом или прецизионном шлифовании. Поэтому в качестве одного из подходов к совершенствованию этого процесса можно считать создание возможности разделения процессов черновой и чистовой обработок по методу охлаждения зоны шлифования.

#### *1.3.4. Правка режущей поверхности круга как фактор снижения температуры и обеспечения ее стабильности при шлифовании*

Использование шлифовальных операций на завершающих этапах изготовления большинства ответственных деталей позволяет

сформировать требуемые показатели их качества. Основными требованиями к абразивной обработке является повышение производительности и снижение себестоимости обработки при сохранении необходимого качества обработанных поверхностей деталей машин [59], [60], [79]. Известно [88], что правка абразивных инструментов осуществляется для восстановления их режущих свойств и правильной геометрической формы. Правке подвергаются шлифовальные круги сразу после установки их на станок, а также те из них, которые затупились («засалились») или потеряли геометрическую форму в процессе работы. Критерием затупления инструмента является ухудшение качества обработанной поверхности, снижение точности, появление прижогов, участков с характерным блеском, появление вредных вибраций, дробления и т. д. За счет формирования необходимого макро- и микрорельефа на РПК шлифовальных кругов можно дополнительно снизить температуру шлифования на 20 – 30 % [134]. Поэтому в автоматизированном производстве правку осуществляют принудительно через заранее заданные интервалы времени.

Считается, что преимущества процесса шлифования реализуются наиболее полно только в том случае, когда вместе с ним получает аналогичное или опережающее развитие технология восстановления геометрии и режущей способности абразивных кругов с помощью их правки. Таким образом, совершенствование процессов правки абразивных кругов является важнейшим условием повышения эффективности шлифования деталей в целом. Прежде всего, это достигается путем использования более производительных и износостойких видов правящих инструментов и оптимизации технологических условий правки [54], [71], [81], [112], [146].

Известно, что абразивные круги в большей степени изнашиваются, как правило, не в процессе шлифования, а при их правке. Так, расходы шлифовальных кругов на правку составляют 90 – 95 % от их общих расходов, себестоимость правки достигает 70 % от себестоимости технологической операции шлифования, а затраты времени могут достигать 40 – 50 % штучного времени на обработку [143]. Очень важно, что состояние РПК, сформированное при его правке, имеет доминирующее

влияние на процесс шлифования. От качества правки в первую очередь зависят теплообразование в зоне шлифования, период стойкости круга и производительность обработки, параметры качества шлифованных деталей. В свою очередь состояние РПК в значительной степени зависит от вида правящего инструмента и технологических условий правки [54], [143].

Одним из самых распространенных методов правки является метод обтачивания [54]. Существенное влияние на работоспособность правящего инструмента и показатели процесса шлифования имеет правильный выбор вида алмазного сырья [79]. Для изготовления правящих алмазных карандашей используются различные марки алмазов. Проблема замены природных синтетическими алмазами в настоящее время решается путем использования не только синтетических монокристаллов, но и СПА. В связи с этим особое значение приобретают вопросы, связанные с созданием новых видов правящих инструментов, использованием для их изготовления прогрессивных высокопроизводительных инструментальных материалов и более эффективных связок (припоев) для их закрепления в корпусе правящего инструмента.

Алмазные карандаши, являющиеся наиболее перспективным видом правящих инструментов, широко применяются для исправления кругов на операциях круглого и плоского шлифования, а также на резьбо- и зубошлифовальных и др. операциях.

В настоящее время рынок уже имеет значительное число различных типов алмазных карандашей (ГОСТ 607 – 80). При этом практика их применения свидетельствует о том, что альтернативы природному алмазу пока практически нет. Поэтому исследования, связанные с созданием новых марок поликристаллов алмазов, совершенствованием конструкций алмазных карандашей, а также технологий их изготовления и эксплуатации продолжают и сейчас. Их следует считать актуальными и важными для науки и техники. Анализ литературных источников также показал, что вопросы защищенности алмаза от температурного воздействия рассматриваются в основном путем выбора припоев или состава связки для закрепления алмазов методом прессования с определенной рабочей температурой. Однако возможности такого подхода

весьма ограничены, поскольку низкотемпературные припои, как правило, недостаточно прочно удерживают алмаз, а сами подвержены повышенному абразивному износу, что приводит к «оголению» алмаза. Таким образом, на основании анализа литературных данных можно сделать вывод, что к настоящему времени ряд вопросов, относящихся к повышению эффективности использования алмазных правящих карандашей, остается открытым. Сюда можно отнести сравнительно невысокий коэффициент использования алмазов (что связано с их недостаточно надежным удерживанием в державке), неудовлетворительный уровень защищенности алмазов при высокотемпературных режимах закрепления в державке, отсутствие экспресс-методов оценки абразивной способности алмазов еще на этапе их отбора и др. Особенно это касается карандашей на основе СПА. С одной стороны, это связано с тем, что их удельный вес постоянно растет в связи с дефицитностью и дороговизной природного сырья, а с другой с еще не совсем удовлетворительным уровнем стабильности их физико-механических свойств и наличием значительного количества металлической фазы в их составе, что обусловлено технологией их изготовления. Учитывая существенную разницу в значениях коэффициентов линейного расширения алмаза и металлической фазы, последнее обстоятельство (в условиях высоких температур) может привести даже к разрушению алмазных поликристаллов [23]. В связи с этим необходимо провести теоретико-экспериментальные исследования, которые позволили бы найти технические решения, обеспечивающие повышение эксплуатационных характеристик алмазных карандашей еще на этапе их изготовления.

С точки зрения эффективности правки абразивных кругов важным является вопрос выбора марки алмаза [102], [113]. На сегодняшний день известно, что алмазы могут существовать в нескольких формах [114], а именно:

1. Как природные или полученные методом физики высоких давлений монокристаллы величиной до нескольких миллиметров.
2. Как поликристаллы, полученные при высоких давлениях и температурах синтезом при высоких давлениях (СВД) или спеканием.

Так, например, в настоящее время в правящих карандашах широко используются наряду с природными алмазами и различные виды СПА. Наиболее распространенной среди них есть синтетический поликристаллический алмаз (СПА) Syndite, который выпускает известная фирма Element Six Ltd (Шаннон, Ирландия). В рамках СНГ это поликристаллические алмазы типа СВ [79]. Их разработчиком является Всероссийский научно-исследовательский институт твердых сплавов (г. Москва). В течение долгого времени одним из производителей этого алмаза был Полтавский завод искусственных алмазов и алмазных инструментов. Алмазы типа СВ имеют достаточно высокую микротвердость (8 – 10 ГПа) и термостойкость до 1470 К, к тому же имеют изотропию свойств и, что особенно важно, включают в себя относительно небольшое количество металлофазы. Данное обстоятельство, а также относительно низкая стоимость таких алмазов позволяют широко использовать их в правящем инструменте вместо дорогостоящих природных алмазов.

3. Как фазовочистое свободное поликристаллическое алмазное покрытие (CVD-алмаз) с толщиной от нескольких микрон до нескольких миллиметров, которое получается синтезом при низком давлении.

В настоящее время химический синтез алмаза [63], [119] успешно осуществляется посредством использования методов CVD (Chemical Vapor Deposition) с различной активацией газовой фазы, метода химических транспортных реакций и др. CVD-алмазы имеют худшую обрабатываемость и существенно меньшую вязкость ( $\approx 5,5$  МПа/м<sup>2</sup>) по сравнению с алмазами, полученными по другим технологиям. Но, с другой стороны, они имеют более высокую теплопроводность (до 2200 Вт/(К·м)) и микротвердость (до 9000 НВ), а также низкий коэффициент трения (до 0,05) [114]. Например, по данным [178], [179], высококачественный CVD-алмаз может иметь теплопроводность, которая не уступает теплопроводности натуральных алмазов. При приемлемых затратах в настоящее время может обеспечиваться теплопроводность 1000 – 1200 Вт/(м·К) [114]. В связи с этим актуальной является задача проведения предварительных исследований для выявления эффективности

использования CVD-алмаза для правки абразивных кругов и установление возможной перспективы замены природного алмаза. В работах [176], [114] высказывается мнение о перспективности применения CVD-алмаза в алмазных правящих карандашах. По мнению автора, использование правящего столбика с CVD-алмазом, который состоит из массы связанных между собой алмазных частиц и не проявляет зависимости свойств от направления, а следовательно, не требует ориентации алмаза, что значительно упрощает технологию его изготовления. Таким образом, резервом повышения эффективности правки абразивных кругов алмазными инструментами следует считать, с одной стороны, выбор рациональной марки алмаза, разработку оптимальных конструкций и технологии изготовления алмазных карандашей (повышение эффективности на этапе их изготовления). А с другой – на этапе эксплуатации, например, за счет создания условий для обильного охлаждения зоны правки [72]. Так, например, согласно ГОСТ 607 – 80 производительность подачи ТЖ в зону правки должна быть не менее 20 л/мин.

Как показывают исследования [23], [57], [62], [141], при разработке новых и совершенствовании существующих подходов к процессам резания очень эффективным инструментом является методология 3D-моделирования, основанная на МКЭ. С ее помощью можно дать также ответ на вопрос о роли металлофазы в составе СПА на этапах изготовления и эксплуатации правящих карандашей.

Толстослойные поликристаллы CVD-алмазы выпускаются в настоящее время в виде таблеток с толщиной алмазного слоя в пределах от 0,5 до нескольких миллиметров. Подложка из твердого сплава создает эффект опоры в смысле увеличения прочности таблетки на изгиб [166]. Прогнозы указывают на высокую вероятность повышения объема потребления CVD-алмазов в ближайшей перспективе (до 20 %). Анализ литературных источников показал, что толстослойный CVD-алмаз заполняет нишу между естественным и синтетическими (полученными методом синтеза при высоких давлениях) алмазами. В ближайшем будущем это альтернатива природному алмазу [102], [154], [166], [178]. Основной областью применения толстослойных CVD-алмазов является

обработка алюминиевых сплавов с содержанием кремния до 21 %, волокнистых композитов, древесины, вольфрама, дерева (и особенно ламинированного) и прочее. В последнее время эти алмазы начали применять для правки шлифовальных кругов [176].

Особенностью CVD-алмазов является то, что в противовес алмазам, полученным методом СВД, в них отсутствует металлофаза (например, кобальт как у Syndite), что не позволяет обрабатывать его электроэрозионными методами [69], [171]. Поэтому раскрой таблеток CVD-алмаза (диаметром 57 – 80 мм) на необходимые элементы (параллелепипеды) выполняется с помощью лазерного луча. На рис. 1.8 приведены конструкции правящих карандашей с использованием СПА. Основные конструктивные параметры алмазных карандашей, представленных на рис. 1.8, приведены в таблице 1.

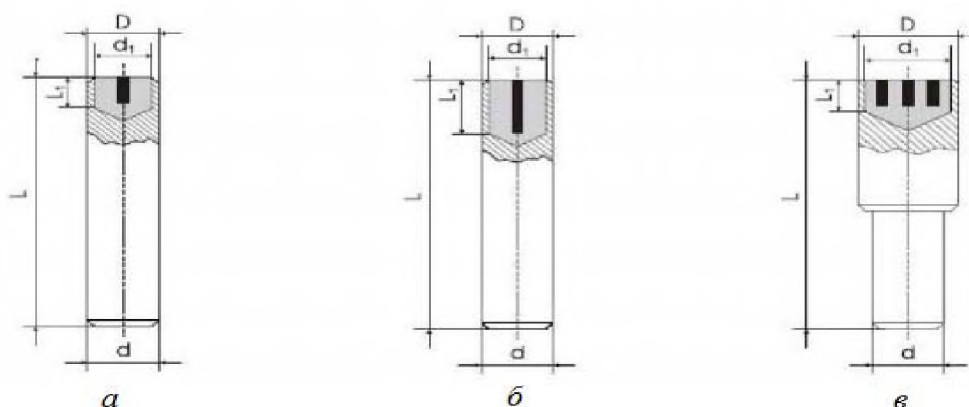


Рисунок 1.8 – Конструкции алмазных карандашей из CVD-алмаза [155]:

*а* – тип 01, исп. А, шифр 800053; *б* – тип 01, исп. А, шифр 800054;  
*в* – тип 02, исп. С, шифр 800053

Известно, что для правки абразивных кругов применяются одно – и многокристальные карандаши. Ориентация алмаза при установке в державке карандаша при их производстве [176] (с учетом «жесткого» и «мягкого» направлений) является в таком случае обычной практикой (рис. 1.9).

Естественно, что однородность свойств карандашей обеспечить при этом трудно. При использовании многокристальных алмазных карандашей на основе природного алмаза, например, указанную ориентацию



осуществить практически невозможно, что в свою очередь не позволяет использовать их потенциальные возможности.

В источниках информации [155], [156], [176] предоставлена информация об успешности практического применения CVD-алмаза для изготовления различных инструментов, в том числе и алмазных правящих карандашей. По мнению автора работы [176], использование правящего столбика из CVD-алмаза, который состоит из массы связанных между собой алмазных частиц и не проявляет зависимости свойств от направления, не требует указанной выше ориентации алмаза.

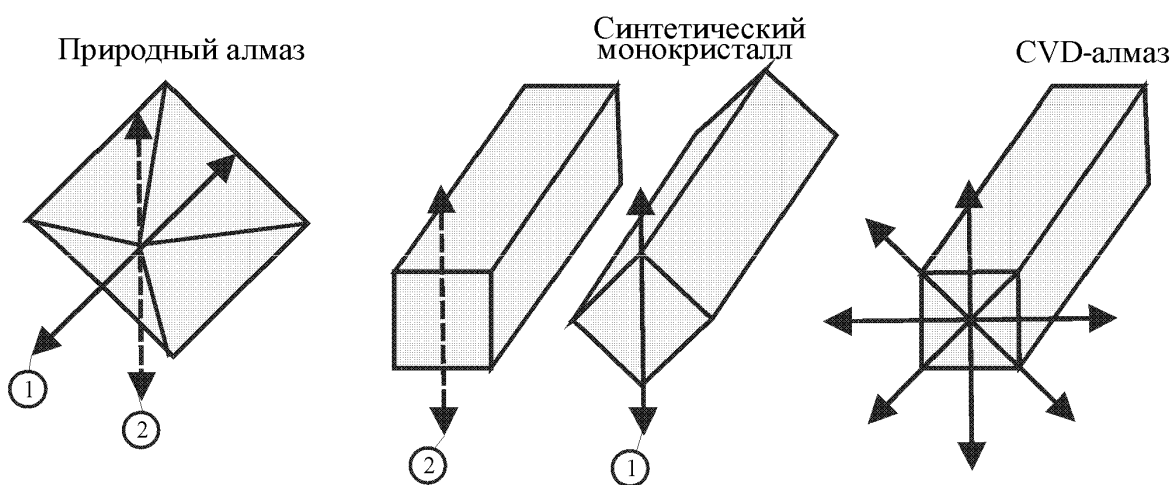


Рисунок 1.9 – Схематическое изображение зависимости микротвердости алмаза [176]: 1 – «твердое» направление; 2 – «мягкое» направление

Таблица 1 – Конструктивные параметры алмазных карандашей

Шифр	Тип	Исполнение	D, мм	d, мм	d <sub>1</sub> , мм	L, мм	L <sub>1</sub> , мм
800053	01	A	10	10	8	42	5
800054	02	A	10	10	8	42	9
800053	01	C	14	10	12	42	5

Использование алмазных заготовок в виде параллелепипедов позволяет увеличить прочность содержание алмаза в державке, улучшить стабильность показателей за счет постоянной площади контакта карандаша с абразивным кругом, а также обеспечить постоянство работы правящего инструмента за счет равномерности свойств поликристаллов [155].

Независимо от марки алмаза, используемого в правящем карандаше, ряд вопросов остаются нерешенными и актуальными и сейчас. Это снижает эффективность как процесса правки, так и шлифования в целом. На этапе изготовления правящих карандашей это разработка способа предварительного отбора СПА с необходимой абразивной способностью, оптимизация условий и внедрение рационального способа изготовления алмазного правящего карандаша, установление оптимальной марки СПА с точки зрения сохранения его целостности при высокотемпературном закреплении в державке карандаша. На этапе эксплуатации это прежде всего решение вопроса реализации условий надежного и обильного охлаждения СПА в процессе правки абразивного круга и т.д.

#### *1.3.5. Влияние вибраций в зоне обработки на температуру процесса шлифования*

Подведение механической энергии в виде вибраций к инструменту, обрабатываемой детали или ТЖ часто приводит к повышению эффективности технологических операций вообще и шлифования в частности. Причиной этого считают более равномерную загрузку абразивных зерен в процессе шлифования, улучшение доступа ТЖ в зону обработки, интенсификацию удаления продуктов обработки [99].

Интенсификация процесса удаления материала абразивными зернами при обработке с вибрациями связана с постоянным изменением их рабочих граней и углов резания, повышенным динамическим взаимодействием зерен с ОМ, а также увеличенными значениями плотности сетки следов абразивных зерен на обрабатываемой поверхности. Все это приводит к снижению силовой и тепловой напряженности в зоне обработки, а следовательно, повышению производительности обработки и качества поверхности. Дополнительно при этом исключаются такие явления, как самоотпуск поверхностного слоя материала детали, образование микротрещин, интенсивный наклеп.

Особый интерес вызывает случай шлифования поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ), когда в контакте находятся практически равнотвердые материалы – алмазные зерна и обрабатываемые ПСТМ [122]. В таких условиях вибрации могут способствовать

интенсификации самозатачивания алмазных зерен, а следовательно, повышению эффективности процесса обработки (в том числе и за счет снижения температуры обработки). Для подтверждения такого предположения в дальнейшем может быть использована методология 3D-моделирования НДС в зоне контакта алмазных зерен круга с ПСТМ [23], [141].

Анализ литературных источников информации показал, что использование процесса шлифования с введением в зону резания механических колебаний часто сдерживается отсутствием простых конструкций механизмов для их создания [64].

### Выводы

На основе критического анализа источников информации были сформулированы следующие выводы:

1. Проведенный анализ литературных источников свидетельствует о перспективности процесса плоского торцевого шлифования в целом и применительно к станкам с вертикальным расположением оси шпинделя в частности. Основным фактором, сдерживающим масштабы применения такого процесса, является его теплонапряженность, которая связана со значительной площадью контакта РПК с деталью. Важность этого вопроса в последние годы связана с появлением ОМ с нано- и субмикрорекристаллической структурами, которые в силу существенной нестабильности зеренной структуры являются особенно чувствительными к действию теплосиловых факторов.

2. Уменьшение теплонапряженности процесса шлифования за счет использования щадящих режимов обработки приводит, как правило, к снижению производительности обработки. Поэтому более рациональными следует считать такие приемы, которые, наоборот, за счет снижения температуры дают возможность существенно повысить производительность обработки, а следовательно, и эффективность процесса шлифования в целом. В связи с этим задачу снижения теплонапряженности рассматриваемого процесса следует считать важной и актуальной.

3. Рассмотренные существующие подходы к вопросу снижения теплонапряженности процесса плоского торцевого шлифования на сегодняшний день позволяют в определенной степени решать эту задачу, однако их детальный анализ показал, что для дальнейшего повышения эффективности данного процесса необходимо их усовершенствование, что требует проведения дополнительных исследований в этом направлении.

4. Одним из эффективных способов управления площадью контакта режущей поверхности круга (РПК) с деталью, а следовательно, и теплонапряженностью процесса плоского торцевого шлифования следует считать предварительный наклон оси вращения шпинделя. В литературе практически полностью отсутствуют данные об особенностях и закономерностях, связывающих параметры зоны контакта РПК с деталью (и в первую очередь площадь) со значением угла наклона и другими входными факторами.

5. В условиях предварительного наклона оси вращения шпинделя значительными технологическими возможностями обладает глубинная схема обработки, поскольку при неполном контакте РПК с деталью внешняя кромка круга получает защиту от образования заборного конуса, что делает процесс шлифования более стабильным и прогнозируемым.

6. Вертикальное расположение оси вращения шпинделя и использование торцевого круга позволяет эффективно и относительно просто реализовать процесс шлифования в сплошном слое ТЖ. Это кардинальным образом повышает надежность процесса в плане охлаждения зоны шлифования и предотвращения возникновения дефектов на поверхности обрабатываемых деталей. Однако совершенствование такого процесса может позволить существенно расширить его технологические возможности. Это в первую очередь касается вопроса совершенствования устройств для подачи ТЖ во внутреннюю полость круга и создание возможности разделения процессов черновой и чистовой обработок по методу охлаждения зоны шлифования.

7. На эффективность процесса шлифования в значительной степени влияет правка РПК. Совершенствовать этот процесс можно за счет максимального приближения показателей работоспособности СПА к природному алмазу по двум направлениям. Первый связан с созданием

условий для повышения ресурса алмазных правящих карандашей из СПА еще на этапе их изготовления, а второй – с совершенствованием самого процесса правки. Исчерпывающих данных по этому вопросу в литературе нет.

8. Для установления условий совершенствования процесса плоского торцевого шлифования представляется целесообразным использование методологии 3D- моделирования, основанной на методе конечных элементов.

9. Использование процесса шлифования с введением в зону резания механических колебаний дает положительные результаты в плане повышения его эффективности. Особенно это касается шлифования высокотвердых материалов, при обработке которых надо обеспечивать непрерывный процесс самозатачивания зерен круга. Физическая сущность явлений, происходящих в зоне контакта зерен с ОМ, требует уточнения, например, путем 3D-моделирования НДС этой зоны. Практическая реализация процесса шлифования с введением вибраций в зону обработки часто сдерживается отсутствием простых конструкций механизмов для их создания.

На основе проведенного литературного анализа можно сформулировать следующие основные нерешенные вопросы в данной предметной области:

1. Отсутствуют зависимости, связывающие параметры зоны контакта РПК с деталью в условиях предварительного наклона оси вращения шпинделя, что в конечном итоге не дает возможности управлять площадью контакта РПК с деталью, а следовательно, и теплонапряженностью процесса обработки.

2. Отсутствуют концептуальные подходы к созданию условий для обеспечения показателей процесса правки РПК алмазными инструментами с СПА на уровне природных алмазов.

3. Необходимы исследования НДС системы «алмазное зерно – ОМ» в условиях введения вибраций в зону обработки, которые будут способствовать развитию представлений о физических особенностях такого процесса. Важной задачей является упрощение практической реализации комбинированного процесса шлифования, основанного на

использовании вибраций в зоне шлифования путем разработки эффективных устройств для их создания.

4. Требуется своего совершенствования процесс подачи ТЖ в зоны шлифования и правки РПК, а также методы осуществления контроля за степенью заполнения зон шлифования и правки круга ТЖ.

На основании проведенного анализа была выдвинута рабочая гипотеза, суть которой заключается в существовании возможности повышения эффективности процесса плоского торцевого шлифования путем управления параметрами зоны контакта круга с деталью.

Объединяющая идея представленной работы заключается в комплексном теоретико-экспериментальном исследовании процесса плоского торцевого шлифования с предварительным наклоном оси шпинделя и разработке на этой основе мероприятий по совершенствованию условий снижения тепловой напряженности в зоне контакта РПК с деталью и их частичного или полного совмещения в одном станке.

На рис. 1.10 представлена структурно-логическая схема работы, которая отражает постановку задачи и пути достижения поставленной цели.

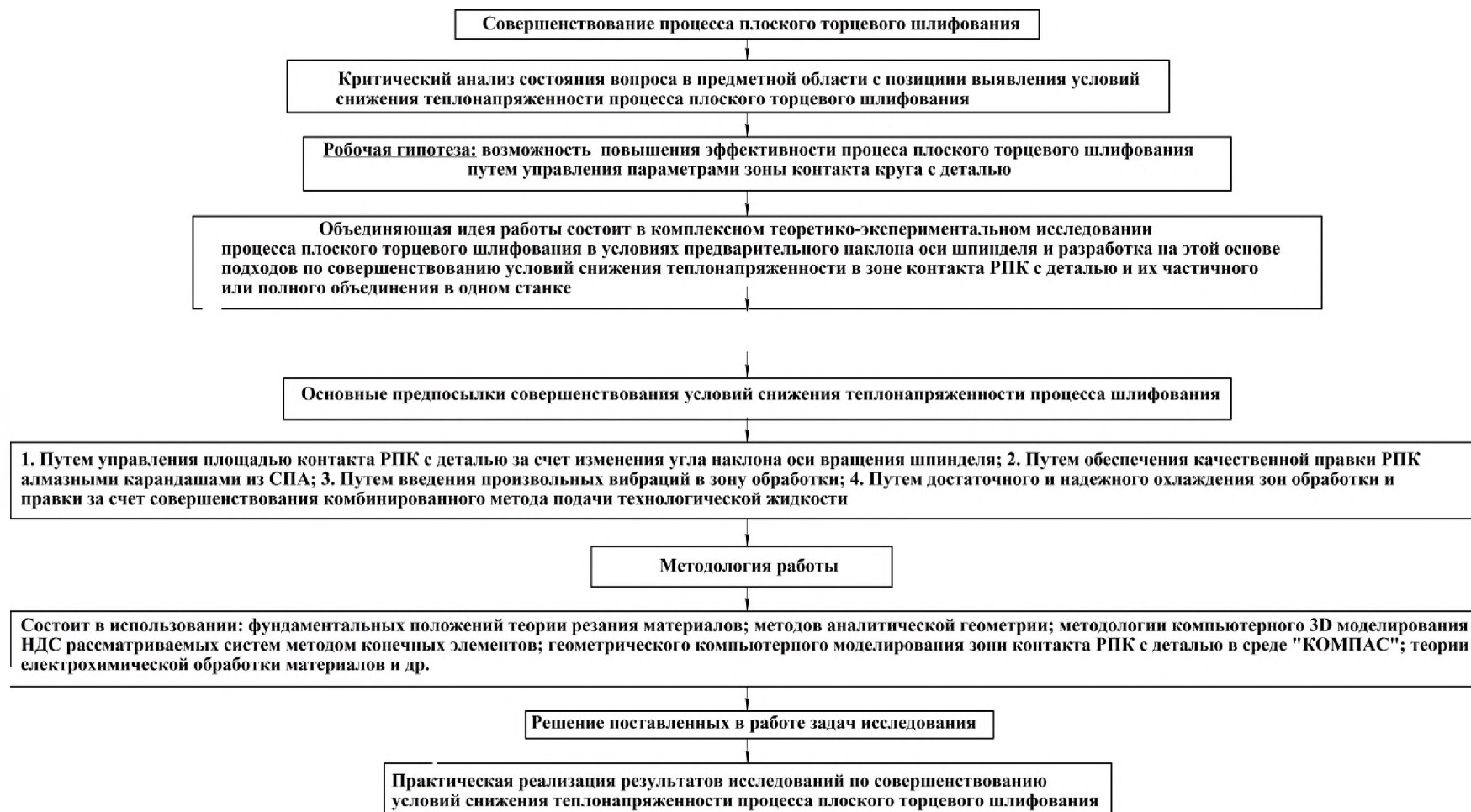


Рисунок 1.10 – Структурно-логическая схема исследований

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ЗОНЫ КОНТАКТА КРУГА С ДЕТАЛЬЮ ПУТЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАКЛОНА ОСИ ВРАЩЕНИЯ ШПИНДЕЛЯ

*Как было отмечено в разделе 1, одним из важных факторов, влияющих на теплонапряженность процесса плоского торцевого шлифования, является площадь зоны контакта РПК с деталью. Она непосредственно влияет на мощность теплового источника. Для управления этой мощностью надо знать зависимости площади от условий обработки. В разделе с применением методов аналитической геометрии и компьютерного геометрического моделирования (которые в данном случае органично дополняют друг друга) были установлены зависимости для расчета линейных параметров зоны контакта РПК деталью, которые являются составляющими для расчета площади и самой площади, с условиями процесса шлифования. Поскольку вследствие поворота оси вращения шпинделя при торцевом шлифовании «на проход» возникают отклонения от плоскостности или остаточные гребешки на обрабатываемой поверхности при многопроходной обработке, то параллельно были получены аналитические зависимости для их определения. Это дает возможность технологу корректно подойти к разработке технологических операций плоского торцевого шлифования.*

### **2.1. Исследование влияния условий обработки на длину зоны контакта режущей поверхности круга с деталью**

Как указано выше, объектом исследования был выбран процесс плоского торцевого шлифования, который выполняется на станках, как с вертикальным, так и с горизонтальным расположением шпинделя. Величина угла  $\alpha$  связана не только со значением зазора  $\delta$  (см. рис.1.5), а также с величиной диаметра круга  $d_k$ . Значения углов  $\alpha$  можно рассчитать в зависимости от зазора  $\delta$  при учете диаметра круга. Результаты этих расчетов [56] применительно к величинам зазора  $\delta$ , рекомендованных в литературе [80], [131], приведены на рис. 2.1. Они свидетельствуют о том,



что в диапазоне значений зазоров  $\delta$  от 0,05 (рис. 2.1, а) до 2 мм (рис. 2.1, б) величина угла не превышает один градус.

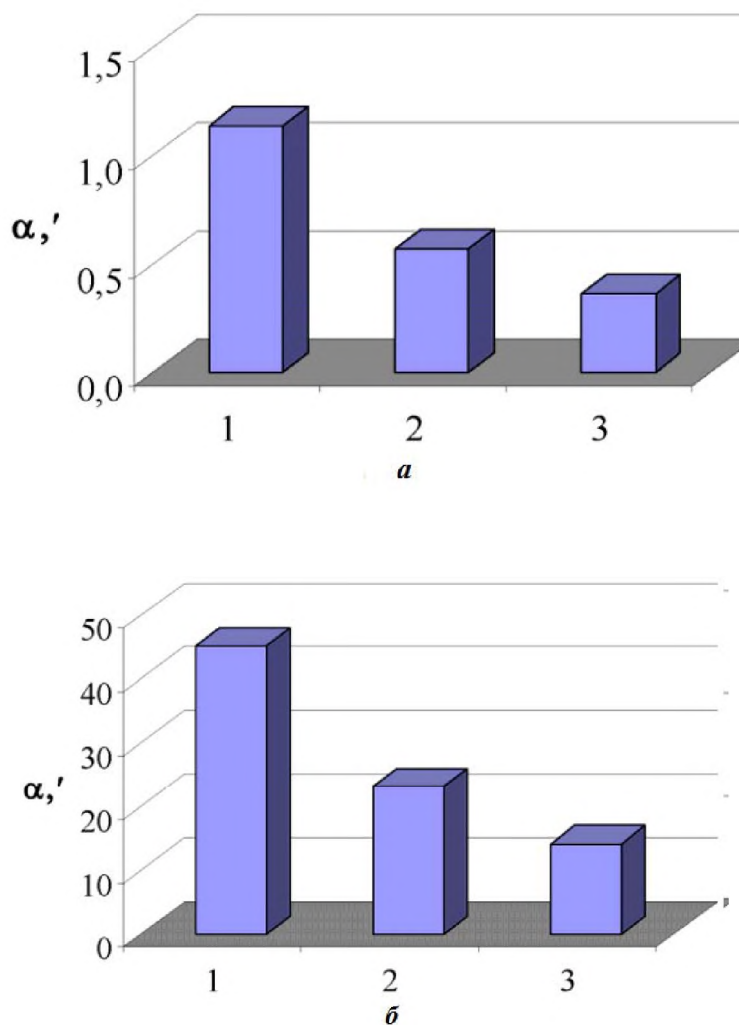


Рисунок 2.1 – Зависимость угла наклона  $\alpha$  от диаметра круга  $d_k$ :

1-  $d_k = 150$  мм;

2-  $d_k = 300$  мм;

3 -  $d_k = 500$  мм.

Зависимости  $\alpha = f(d_k)$  при  $\delta = \text{const}$  имеют нелинейный, а зависимости  $\alpha = f(\delta)$  при  $d_k = \text{const}$  линейный характер и приведены на рис. 2.2. Эти данные [109] не совпадают с рекомендациями работы [68], в которой предлагается угол наклона принимать в диапазоне  $\alpha = 2^\circ - 4^\circ$ .

Это свидетельствует о том, что существующие рекомендации по выбору значений углов для реализации процесса торцевого шлифования с

предварительным наклоном оси шпинделя нужно пересмотреть с учетом влияния других параметров (например, диаметра круга и глубины обработки).

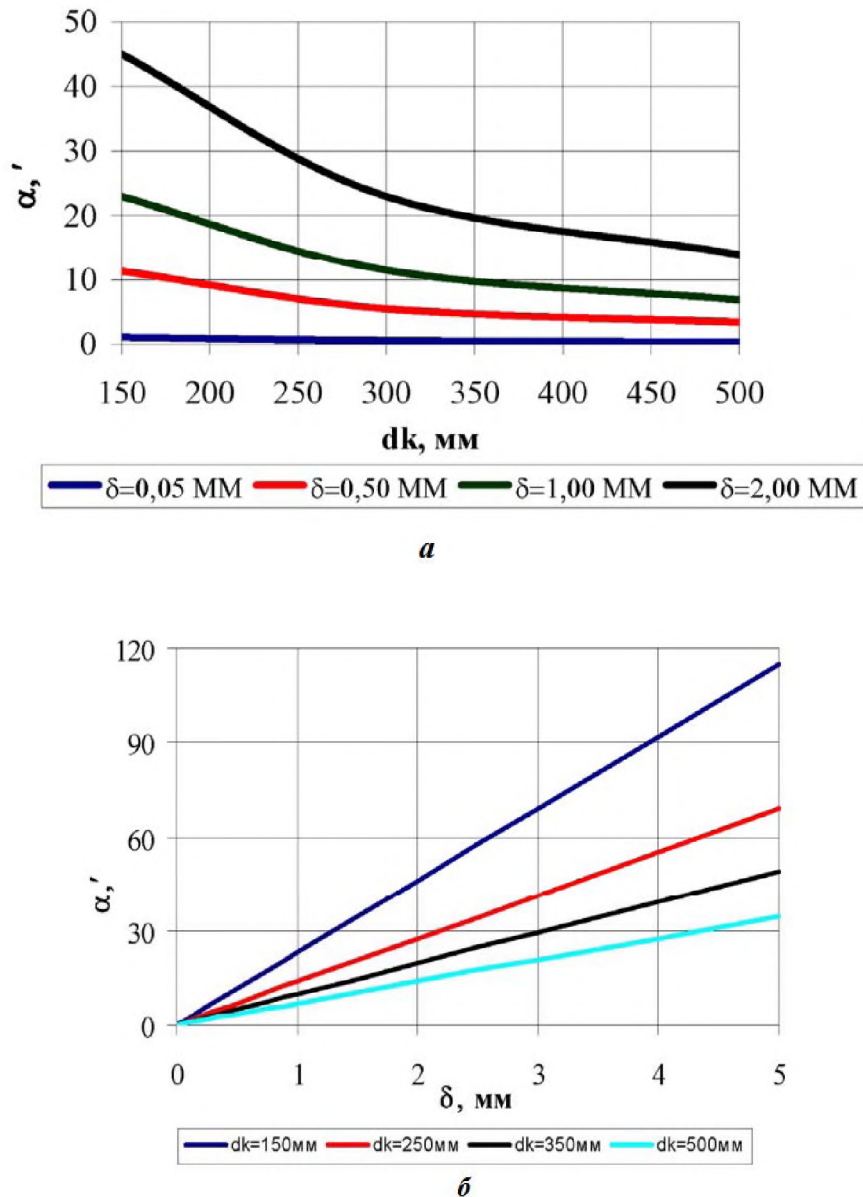


Рисунок 2.2 – Зависимости  $\alpha = f(d_k, \delta)$

Это позволит разработать научно обоснованные рекомендации по совершенствованию процесса плоского торцевого шлифования на станках, как с вертикальным, так и с горизонтальным расположением шпинделя (например, применительно к заточным технологическим операциям).

Параметры зоны контакта круга с деталью определяются в основном тремя факторами, а именно: углом наклона круга (оси шпинделя)  $\alpha$ , глубиной шлифования  $t$  и диаметром круга  $d_k$  (рис. 2.3). По мере увеличения значения угла  $\alpha$  при неизменной глубине резания  $t$  часть РПК, которая будет контактировать с деталью, уменьшается.

Введем такой показатель, как длина (максимальная) контакта РПК с деталью ( $W'$ ), который является важной характеристикой глубинной схемы обработки. Как видно из рис. 2.3,  $a$ , по мере роста угла  $\alpha$  эта длина будет уменьшаться (при  $t=\text{const}$ ) по закону:

$$W' = \frac{t}{\sin \alpha}. \quad (2.1)$$

При предварительной обработке, когда значения углов наклона оси шпинделя лежат, например, в диапазоне  $1 - 4^\circ$ , в контакте с деталью будет находиться только часть ( $W'$ ) полной ширины рабочей поверхности круга ( $W$ ). Так, согласно формуле (2.1), в диапазоне глубин  $t = 0,01 - 0,09$  мм,  $W' = 0,15 - 5,17$  мм. Очевидно существование конкретных сочетаний параметров  $\alpha$ ,  $d_k$  и  $t$ , при которых при условии, что ширина обрабатываемой поверхности детали не меньше диаметра круга ( $B \geq d_k$ ), РПК будет полностью контактировать с деталью. При этом должно выполняться условие, что  $W' = d_k$ . При симметричном шлифовании формула для определения величины угла  $\alpha$ , при котором будет иметь место полный контакт РПК с деталью (рис. 2.3,  $b$ ), имеет вид:

$$\alpha = \arcsin \frac{AB}{BC} = \arcsin \left( \frac{t}{d_k} \right) \quad (2.2)$$

При обычной (не глубинной) схеме шлифования полный контакт РПК с деталью имеет место при  $\alpha = 0$ . Но при этом основная масса припуска снимается только частью РПК (на которой образуется заборный конус [39], [77]). Другая (торцевая) часть РПК как бы подчищает поверхность. При глубинной схеме шлифования, когда есть врезание РПК в тело детали на глубину  $t$ , полный контакт РПК с поверхностью изделия может иметь место и при  $\alpha > 0$ . Графики, представленные на рис. 2.4,  $a$ ,  $b$ , соответствуют такому сочетанию параметров  $\alpha$ ,  $d_k$  и  $t$ , при которых РПК будет полностью контактировать с деталью.

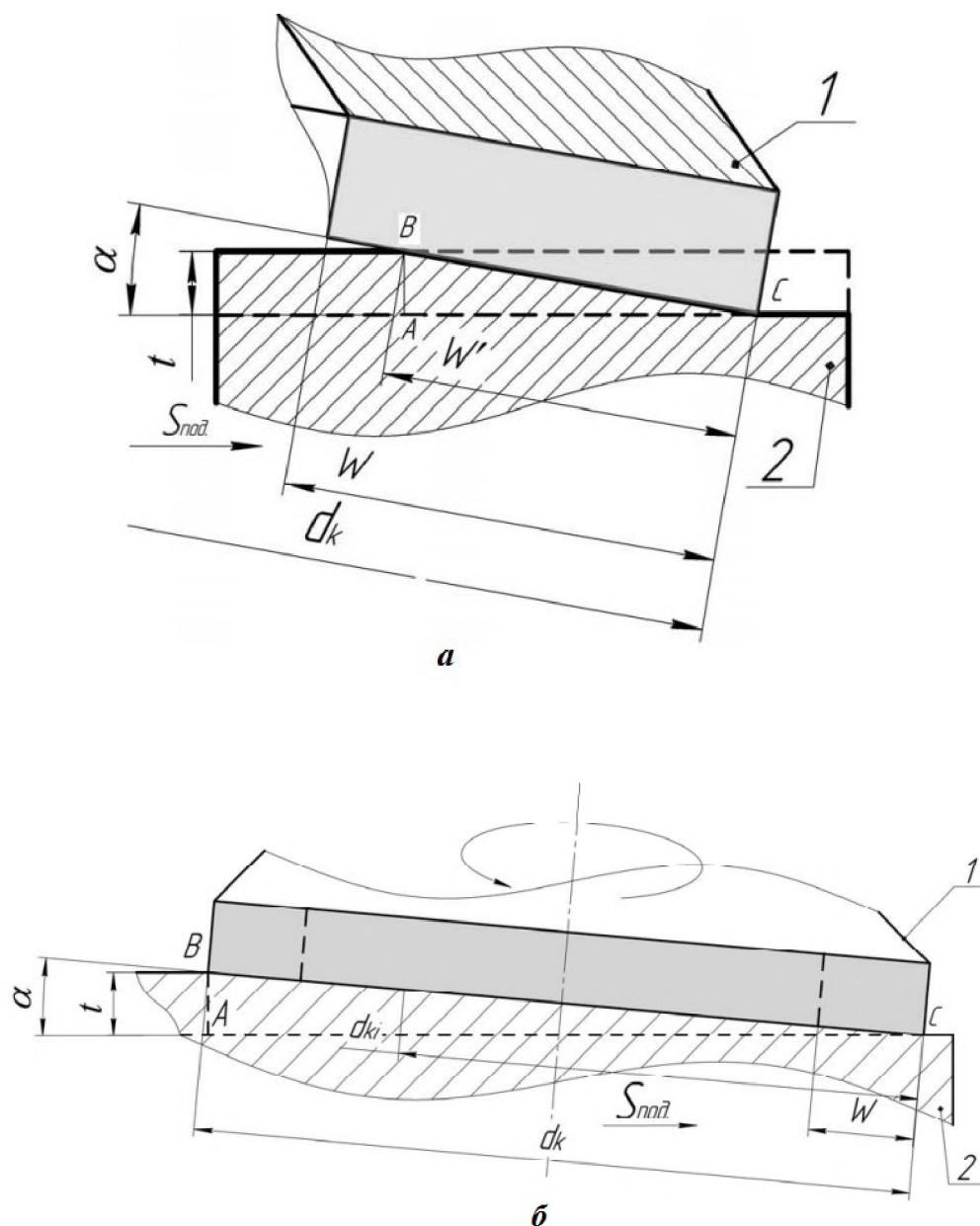


Рисунок 2.3 – Схемы, которые иллюстрируют случаи частичного (а) или полного (б) контакта РПК с деталью

В отличие от обычной схемы обработки РПК будет нагружена более равномерно, что положительно отразится, например, на постоянстве макропрофиля круга.

Как видно из приведенных графиков и формулы (2.2), чем больше глубина шлифования и меньше диаметр круга, тем при больших значениях

углов предварительного наклона оси шпинделя будет иметь место полный контакт РПК с деталью, и наоборот.

Значения углов  $\alpha$ , при которых реализуется схема полного контакта РПК с деталью, очень малы (от нескольких до десятка минут, рис. 2.4). Поэтому можно сделать вывод, что разница зон 2 и 3 характерных рисок на поверхности детали (см. рис. 1.5) чисто условная.

В случае необходимости работы только одной частью торцевого шлифовального круга (в пределах ширины РПК, например, при выполнении операций заточки инструментов) теоретический и практический интерес представляют зависимости между частью ширины  $W'$  круга, углом наклона  $\alpha$  и глубины обработки  $t$ .

На рис. 2.5 приведены графики изменения угла наклона РПК  $\alpha$  в зависимости от длины  $W'$  контакта РПК с деталью. Они свидетельствуют о том, что для достижения одного и того же значения параметра  $W'$  (в зависимости от глубины обработки) углы наклона  $\alpha$  могут существенно отличаться.

Так, при использовании традиционных величин глубины шлифования ( $t \leq 0,1\text{ мм}$ ) углы предварительного наклона оси шпинделя не превышают несколько градусов (рис. 2.5, а). В то же время при больших глубинах они могут составлять десятки градусов (рис. 2.5, б). Таким образом, глубина шлифования является одним из основных параметров, значение которого вместе с величиной угла  $\alpha$  определяет длину ( $W'$ ) контакта РПК с деталью.

На рис. 2.6 приведены данные по влиянию угла наклона шпинделя и глубины обработки на длину зоны контакта РПК с деталью (компьютерное моделирование). Они свидетельствуют о том, что функция  $W' = f(\alpha)$  нелинейная (рис. 2.6, а), а функция  $W' = f(t)$  линейная (рис. 2.6, б).

Показательно, что в достаточно узком диапазоне значений углов ( $\alpha \leq 0,25^\circ$ ) наблюдается наиболее резкая зависимость параметра  $W'$ . Как будет показано ниже, это соответствующим образом отразится и на площади контакта РПК с деталью.

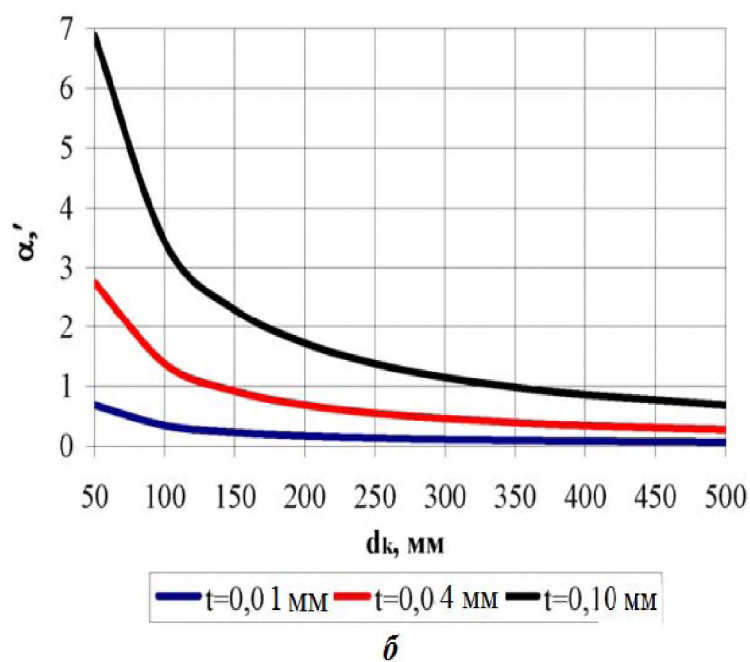
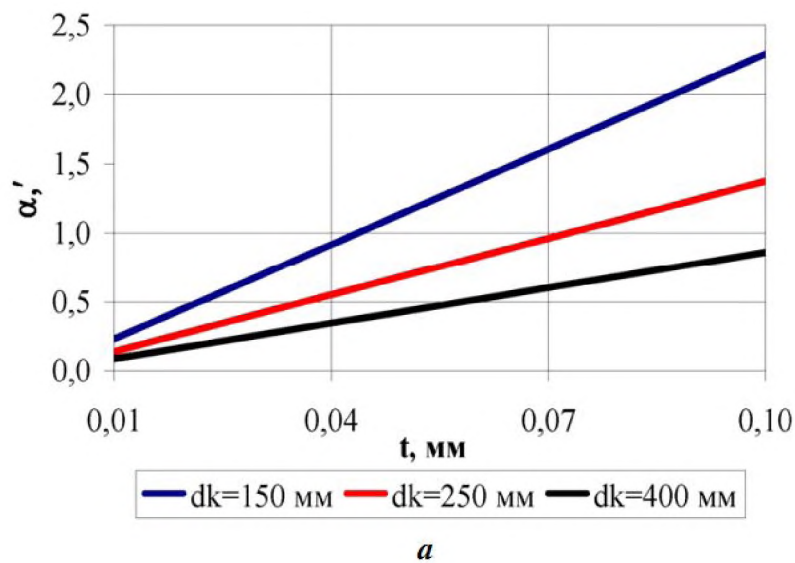


Рисунок 2.4 – Графики зависимостей  $\alpha = f(d_k, t)$  для случая полного контакта РПК с деталью

## 2.2. Исследование влияния условий обработки на ширину и длину дуги и зоны контакта режущей поверхности круга с деталью

Ширина  $B'$  и длина дуги  $L$  контакта РПК с деталью являются очень важными характеристиками.

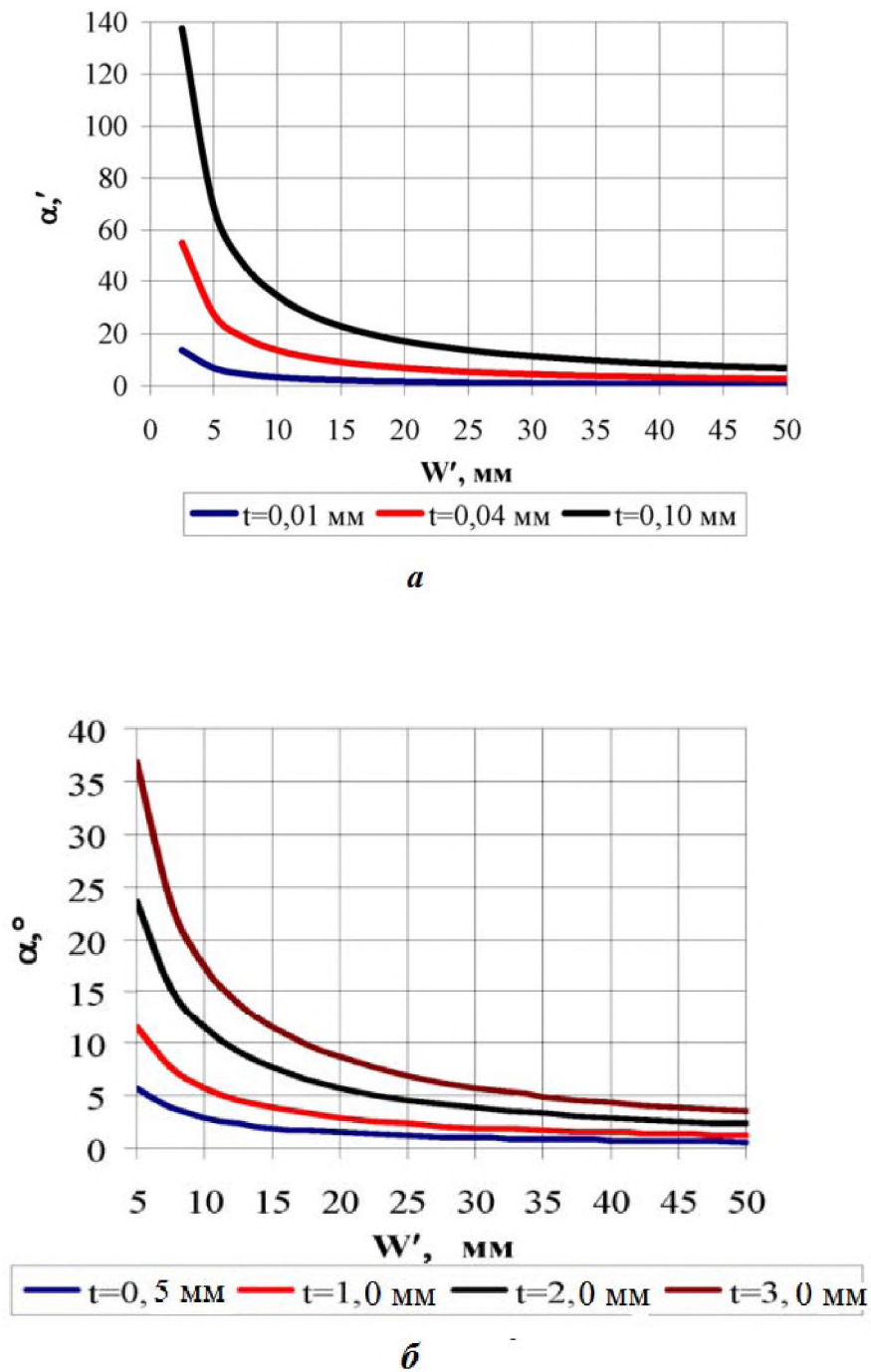


Рисунок 2.5 – Графики зависимостей  $\alpha = f(W', t)$  при шлифовании с обычными (а) и повышенными (б) глубинами обработки

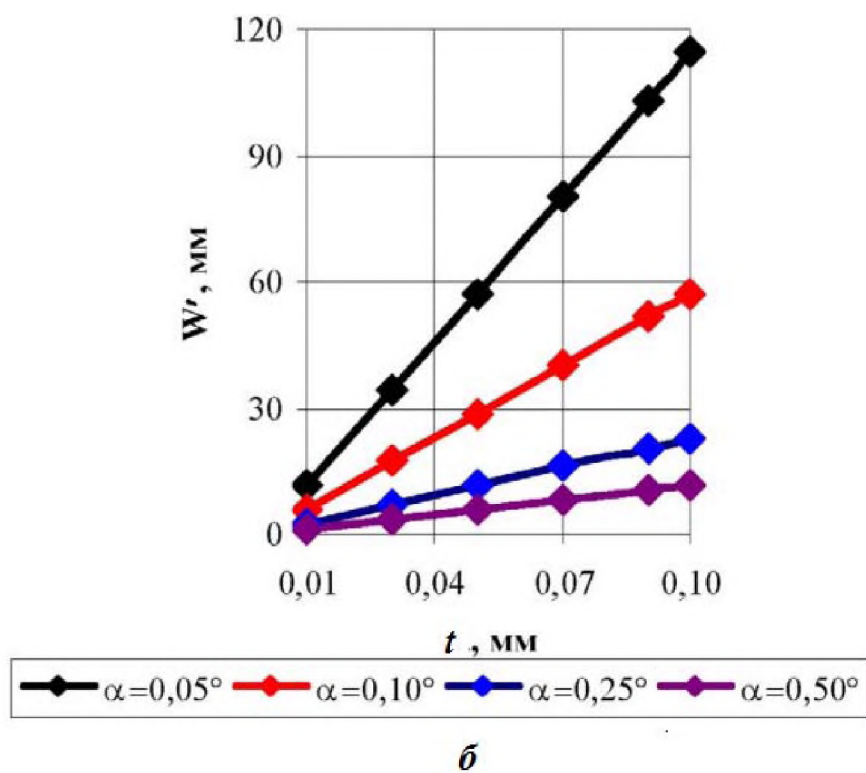
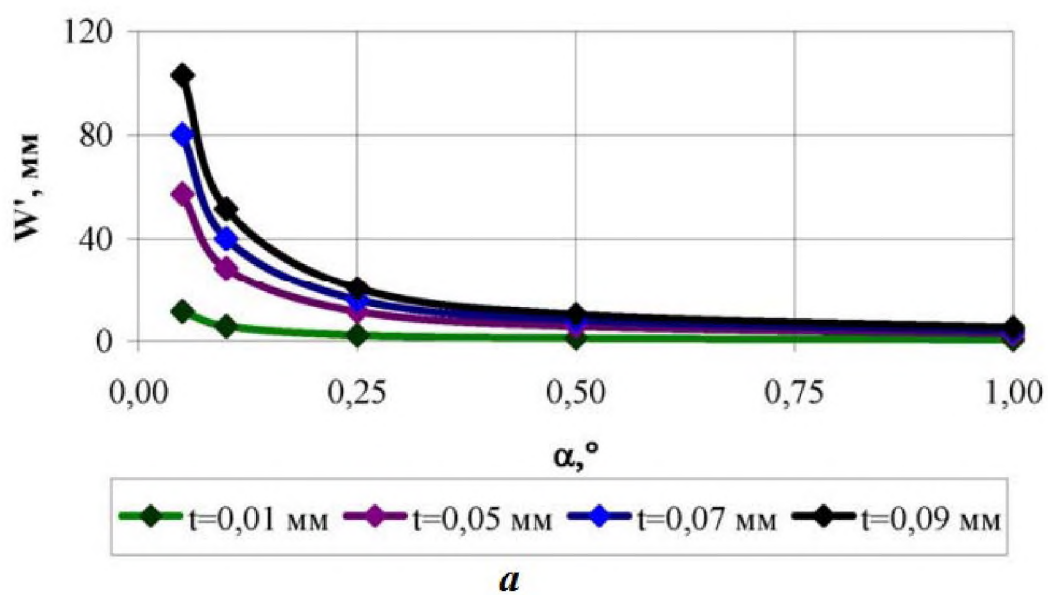


Рисунок 2.6 – Зависимости  $W' = f(\alpha, t)$



По аналогии с лезвийной обработкой первую из них можно считать технологическим, а вторую – физическим параметрами зоны контакта. Ширина контакта, как будет показано ниже, является определяющим фактором для установления необходимой величины поперечной подачи при многопроходном торцевом шлифовании с предварительным наклоном оси шпинделя [106], [172] и других случаях.

Длина дуги контакта вместе с длиной контакта ( $W'$ ) РПК с деталью определяют площадь контакта РПК с деталью [107]. Для установления аналитических зависимостей, которые связывают  $B'$  и  $L$  с условиями обработки, воспользуемся рисунками 2.7 и 2.8 [106].

*Ширина контакта РПК с деталью.* На рис. 2.7, а показана схема контакта торцевого круга 1 с деталью 2 в случае, когда ось шпинделя имеет наклон на угол  $\alpha$ .

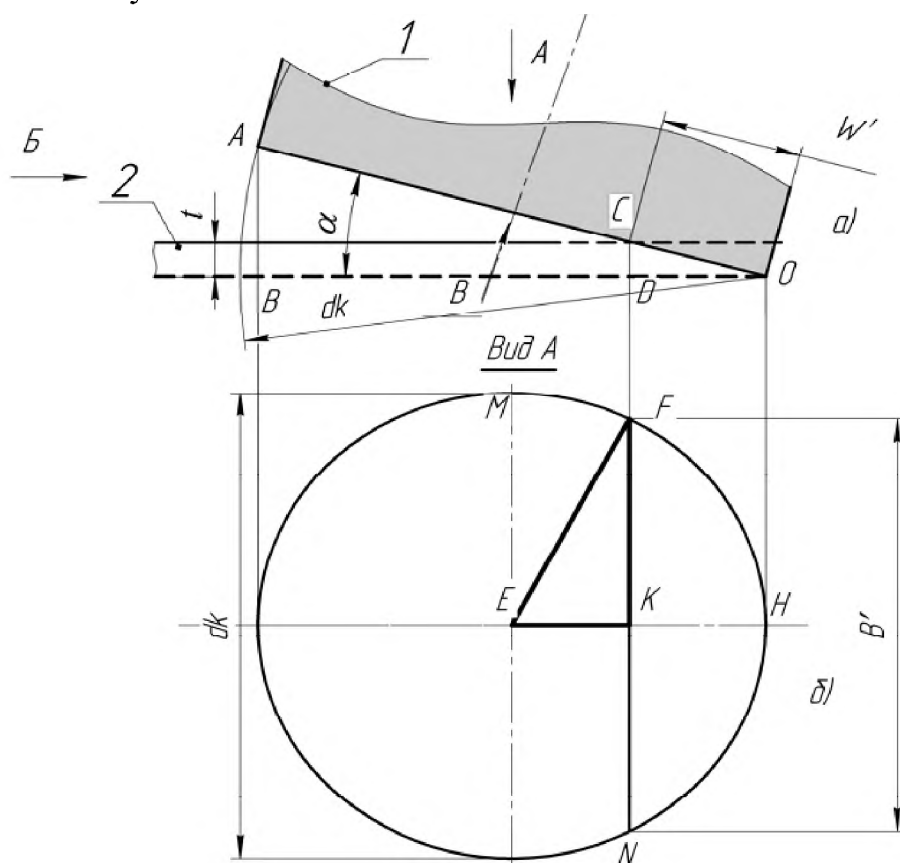


Рисунок 2.7 – Схема для расчета линейных параметров зоны контакта РПК с деталью

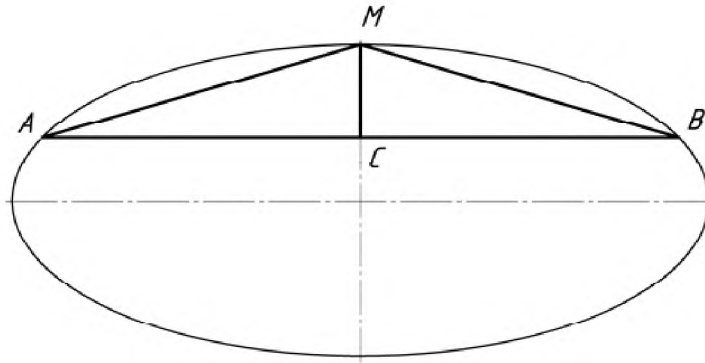


Рисунок 2.8 – Схема для расчета длины дуги зоны контакта РПК с деталью

На рис. 2.7, б показан эллипс как проекция на горизонтальную плоскость окружности, которая наклонена под углом  $\alpha$  [1]. Отрезки  $FN$  и  $FK$  представляют собой ширину ( $B'$ ) и половину ширины ( $B'/2$ ) контакта РПК с деталью соответственно. Из прямоугольного треугольника  $EFK$  имеем, что

$$FK = \frac{B'}{2} = \sqrt{EF^2 - EK^2}. \quad (2.3)$$

Для определения отрезка  $FK$  воспользуемся каноническим уравнением эллипса [1], [47]:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (2.4)$$

где  $x$  и  $y$  - координаты точки  $F$ .

В нашем случае  $x = FK = \frac{B'}{2}$ , а  $y = EK$ .

Как видно из рис. (рис. 2.7, б), большая полуось эллипса ( $EM$ ) имеет длину, равную половине диаметра круга, то есть  $a = \frac{d_k}{2}$ . В свою очередь отрезок  $EN$  представляет собой меньшую полуось эллипса ( $b$ ) и может быть определен с прямоугольного треугольника  $AOB$  (рис. 2.7, а) как

$$EN = b = \frac{OB}{2} = \frac{d_k}{2} \cdot \cos \alpha = a \cdot \cos \alpha. \quad (2.5)$$

На основе вышесказанного, а также уравнения 2.4 с учетом (2.5) имеем, что

$$\frac{B'^2}{4 \cdot a^2} + \frac{EK^2}{a^2 \cdot \cos^2 \alpha} = 1. \quad (2.6)$$

Отрезок  $EK$  можно определить следующим образом (рис. 2.7, б):

$$EK = EH - KH. \quad (2.7)$$

Отрезок  $KH$  может быть определен из прямоугольного треугольника  $COD$ :

$$KH = OD = W' \cdot \cos \alpha = \frac{t}{\sin \alpha} \cdot \cos \alpha = \frac{t}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.8)$$

Тогда уравнение (2.6) с учетом уравнения (2.8) можно записать:

$$\frac{B'^2}{4 \cdot a^2} = 1 - \frac{\left(\frac{d_k}{2} \cdot \cos \alpha - \frac{t}{\operatorname{tg} \alpha}\right)^2}{a^2 \cdot \cos^2 \alpha}. \quad (2.9)$$

Раскрывая это уравнение с учетом того, что  $a = \frac{d_k}{2}$ , имеем

$$B'^2 = \left[ 1 - \frac{4 \cdot \left(\frac{d_k}{2} \cdot \cos \alpha - \frac{t}{\operatorname{tg} \alpha}\right)^2}{d_k^2 \cdot \cos^2 \alpha} \right] \cdot d_k^2. \quad (2.10)$$

Конечное состояние этого уравнения можно записать так:

$$B' = \sqrt{d_k^2 - \frac{4 \cdot \left(\frac{d_k}{2} \cdot \cos \alpha - \frac{t}{\operatorname{tg} \alpha}\right)^2}{\cos^2 \alpha}}. \quad (2.11)$$

Длина дуги контакта РПК с деталью. Для установления аналитической зависимости длины  $L$  дуги  $A\check{B}$  (рис. 2.8) контакта РПК с деталью можно воспользоваться приближенной формулой Гюйгенса [14].

Для нашего случая она имеет вид:

$$L = 2 \cdot AM + \frac{1}{3}(2 \cdot AM - AB). \quad (2.12)$$

Здесь отрезок  $AB$  представляет собой хорду, величина которой равна ширине контакта РПК с деталью, то есть

$$AB = B'. \quad (2.13)$$

Из прямоугольного треугольника  $AMC$  можно записать, что

$$AM^2 = AC^2 + MC^2. \quad (2.14)$$

В свою очередь на основании рис. 2.7 имеем, что  $AC = \frac{AB}{2} = \frac{B'}{2}$ , а

$$MC = OD = \frac{t}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

После подстановки этих выражений в формулу (2.14) имеем

$$AM^2 = \left(\frac{B'}{2}\right)^2 + \left(\frac{t}{\operatorname{tg} \alpha}\right)^2.$$

Или

$$AM = \sqrt{\frac{B'^2}{4} + \frac{t^2}{\operatorname{tg}^2 \alpha}}. \quad (2.15)$$

После подстановки выражений (2.13) и (2.15) в формулу (2.12) можно окончательно записать, что

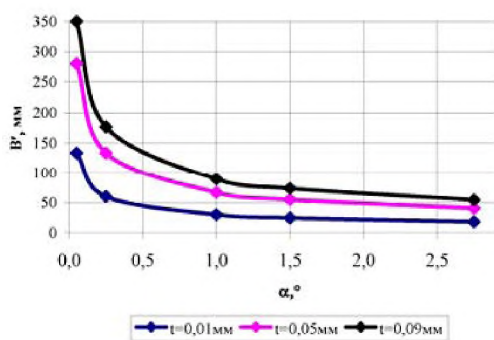
$$L = 2 \cdot \sqrt{\frac{B'^2}{4} + \frac{t^2}{\operatorname{tg}^2 \alpha}} + \frac{1}{3} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{B'^2}{4} + \frac{t^2}{\operatorname{tg}^2 \alpha}} - B'\right). \quad (2.16)$$

Графики зависимости ширины  $B'$  от условий шлифования, выполненные на основе данных геометрического компьютерного моделирования, отражают влияние угла предварительного наклона оси шпинделя  $\alpha$ , глубины шлифования  $t$  и диаметра круга  $d_k$  на ширину  $B'$  контакта РПК с деталью [106] и приведены на рис. 2.9 (общие условия моделирования:  $\alpha = 1^\circ$ ,  $d_k = 400$  мм,  $t = 0,05$  мм).

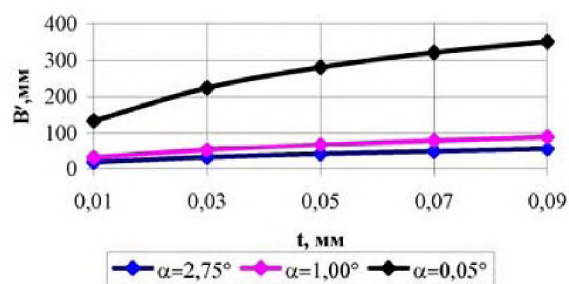
Математическая обработка результатов компьютерного эксперимента методом наименьших квадратов позволила предложить следующую степенную зависимость:

$$B' = 14,92 \cdot t^{0,50} \cdot \alpha^{-0,48} \cdot d_k^{0,50}. \quad (2.17)$$

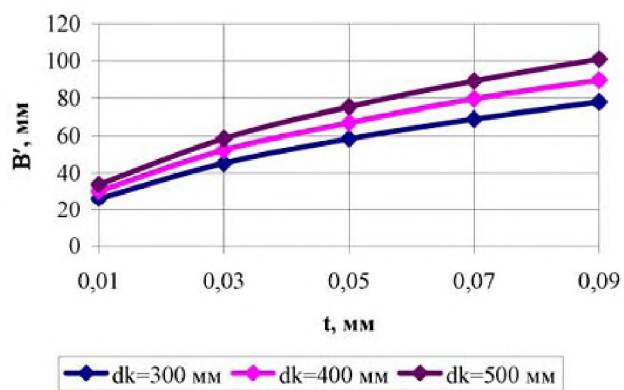
Если значение угла находится в диапазоне  $\alpha \geq 0,1$ , то погрешность между данными, полученными по формулам (2.11) и (2.17), не превышает 5 %. Степенная зависимость (2.17) дает более наглядное представление о влиянии параметров обработки на значение ширины  $B'$  и достаточно удобна для использования технологами в практической деятельности.



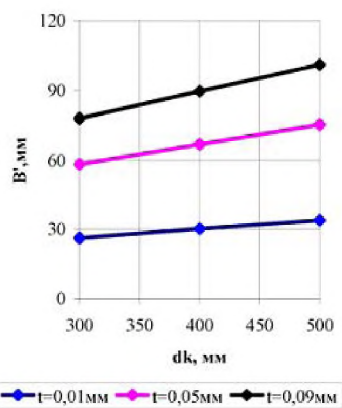
$$a - B' = f(\alpha, t)$$



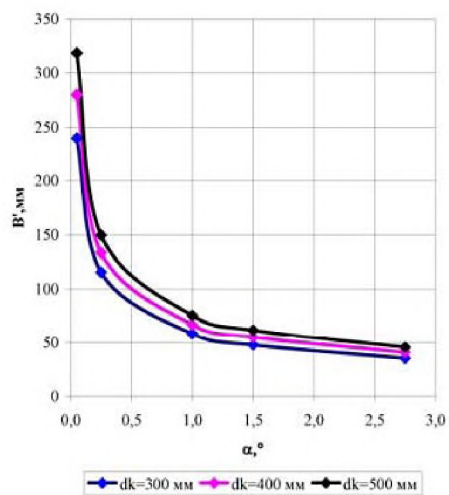
$$b - B' = f(t, \alpha)$$



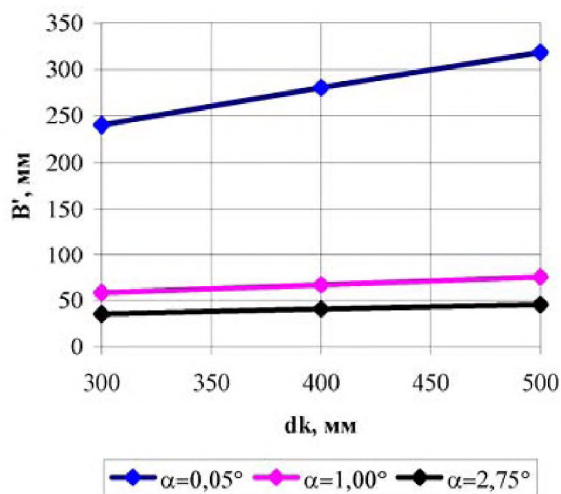
$$c - B' = f(t, d_k)$$



$$d - B' = f(d_k, t)$$



$$e - B' = f(\alpha, d_k)$$



$$f - B' = f(d_k, \alpha)$$

Рисунок 2.9 – Зависимости ширины зоны контакта РПК с деталью от условий обработки

Таким образом, увеличение угла  $\alpha$  и уменьшение диаметра круга и глубины обработки приводят к уменьшению  $B'$ , причем практически с одинаковой интенсивностью.

Степенная зависимость, которая связывает длину дуги с условиями обработки, имеет вид:

$$L = 15,24 \cdot t^{0,50} \cdot \alpha^{-0,50} \cdot d_k^{0,50}. \quad (2.18)$$

Формула (2.18) показывает, что по мере увеличения глубины шлифования и диаметра круга и уменьшения угла наклона длина дуги возрастает. Знание параметров  $B'$  и  $L$  зоны контакта РПК с деталью, как будет показано далее, имеет важное значение с точки зрения практической реализации процесса шлифования с предварительным наклоном оси шпинделя. С одной стороны, они влияют на площадь зоны контакта, а с другой – значение  $B'$  необходимо знать для определения поперечной подачи для многопроходной обработки.

В таблице 2.1 приведен фрагмент сравнительных данных по разным способам определения ширины и длины дуги зоны контакта РПК с деталью.

Таблица 3.1 – Сравнительные данные по разным способам определения факторов\*

$\alpha, ^\circ$	0,05	0,25	1	1,5	2,75
$B'_{\text{км}}, \text{мм}$	280,25	133,45	67,46	55,15	40,78
$B'_{\text{сз}}, \text{мм}$	281,05	129,80	66,72	54,92	41,06
$B'_{\text{аз}}, \text{мм}$	280,25	133,45	67,46	55,15	40,78
$L_{\text{км}}, \text{мм}$	310,28	136,06	67,79	56,33	40,85
$L_{\text{сз}}, \text{мм}$	304,80	136,31	66,72	55,65	41,10
$L_{\text{аз}}, \text{мм}$	310,28	136,06	67,79	56,33	40,85

\* $B'(L)_{\text{км}}$  – компьютерное моделирование,  $B'(L)_{\text{сз}}$  – степенная зависимость [106],  $B'(L)_{\text{аз}}$  – аналитические зависимости (2.11) и (2.16). Общие условия обработки:  $d_k = 400 \text{ мм}$ ;  $t = 0,05 \text{ мм}$ .

Они, во-первых, подтверждают правильность аналитических формул (в данном случае зависимости (2.11) и (2.16)), а во-вторых,

свидетельствуют о достаточно высокой точности степенных зависимостей, полученных путем математической обработки данных компьютерного геометрического моделирования [18] (погрешность не превышает 5 %). Заметим, что эти погрешности связаны не с самим методом компьютерного геометрического моделирования, а являются результатом процесса аппроксимации данных (методом наименьших квадратов [159]) эксперимента степенными зависимостями.

### **2.3. Исследование влияния условий обработки на отклонение формы плоской поверхности при шлифовании «на проход»**

Одним из существенных недостатков схемы плоского торцевого шлифования с предварительным наклоном оси шпинделя является то, что на плоской поверхности детали в силу кинематики неизбежно формируются отклонения формы [49], [68], [80], [131]. В нашем случае имеет место частный случай отклонения от плоскостности – вогнутость ( $\Delta$ ). На настоящий момент исследований, связанных с особенностями формирования отклонений формы плоских поверхностей при такой схеме обработки, практически нет. На практике это может привести либо к значительному проценту брака изделий, или к повышению трудоемкости чистовых стадий обработки шлифованием.

При шлифовании «на проход» для технолога особенно важно знать значение вогнутости на том этапе обработки, когда круг полностью контактирует с поверхностью детали (по ширине  $B$ ). Очевидно, что чем больше ширина обрабатываемой поверхности, тем большие значения отклонения от плоскостности будут иметь место при неизменных других условиях обработки.

В своих исследованиях [104], [109] мы учитывали тот факт, что для обеспечения требуемых значений отклонения от плоскостности нужно иметь ее зависимость от величины угла наклона  $\alpha$ . Анализ схемы обработки показывает, что вогнутость является функцией нескольких параметров. Она имеет вид:  $\Delta = f(\alpha, d_k, B)$ . Это можно считать особенностью рассматриваемого процесса, потому что в случае обработки без наклона оси шпинделя теоретически последние два параметра не влияют на отклонение формы.

На рис. 2.10 (вид Б, рис. 2.7, б) приведена схема образования отклонения от плоскостности  $\Delta$  в процессе плоского торцевого шлифования по симметричной схеме «на проход» [104].

Как видно из рис. 2.10, при первом проходе  $\Delta$  равна глубине шлифования, то есть  $\Delta_1 = t$ . В дальнейшем по мере осуществления нескольких проходов с глубиной шлифования  $t$  величина  $\Delta$  постепенно растет и равняется значению  $\Delta_i$ . При этом длина дуги контакта РПК с поверхностью детали также постепенно растет (от  $L_1$  к  $L_i$ ).

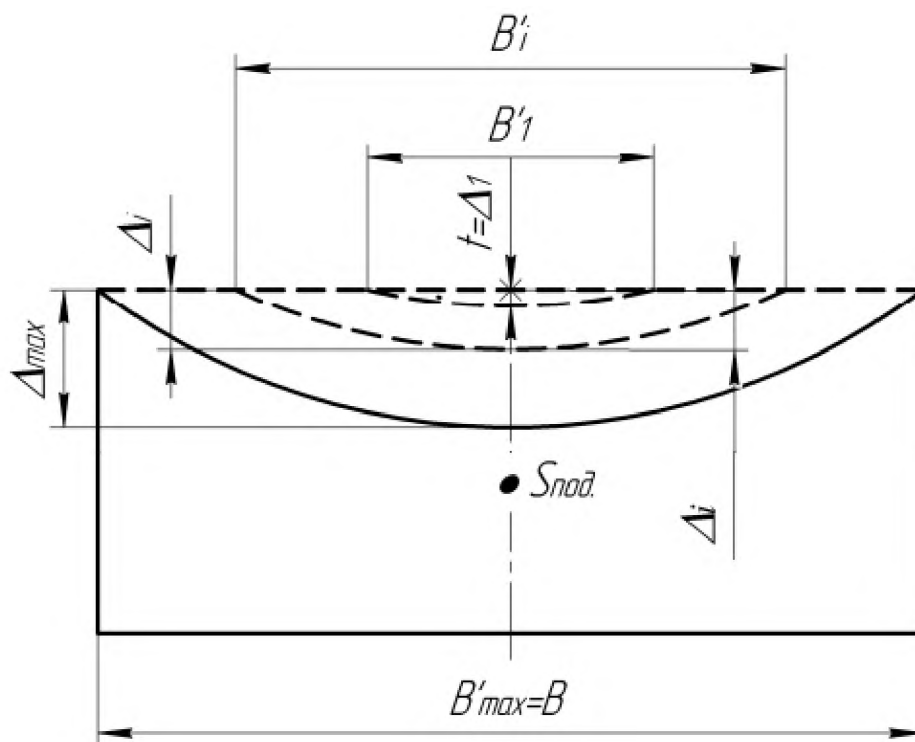


Рисунок 2.10 – Схема образования отклонения от плоскостности  $\Delta$  при плоском торцевом шлифовании

В случае, когда РПК начнет контактировать с деталью по всей ширине обрабатываемой поверхности ( $B'_{\max} = B$ ), получили, что  $\Delta = \Delta_{\max} = \text{const}$ .

Для вывода аналитической зависимости, которая связывает  $\Delta$  с указанными параметрами, воспользуемся рис. 2.7. При этом имеем в виду, что отрезок  $CD$  представляет собой не единичное, а суммарное значение глубины  $\Delta$  обработки (до момента, когда РПК будет контактировать с



поверхностью детали по всей ширине), а следовательно,  $B' = B$ . То есть в нашем случае  $\Delta = CD$ . Тогда можно записать, что

$$\Delta = OD \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.19)$$

В свою очередь имеем:

$$OD = KH = EH - EK. \quad (2.20)$$

Из треугольника АОВ вытекает:

$$EH = \frac{OB}{2} = \frac{d_k}{2} \cdot \cos \alpha. \quad (2.21)$$

Для определения отрезка  $EK$  воспользуемся каноническим уравнением эллипса (2.4).

В нашем случае  $x = FK = \frac{B}{2}$ ,  $y = EK$ . Меньшая полуось эллипса может быть выражена через большую как  $b = a \cdot \cos \alpha$  (рис. 2.7).

Тогда это уравнение будет иметь вид:

$$\frac{B^2}{4 \cdot a^2} + \frac{EK^2}{a^2 \cdot \cos^2 \alpha} = 1.$$

Или

$$EK = \sqrt{\left(1 - \frac{B^2}{4 \cdot a^2}\right) \cdot a^2 \cdot \cos^2 \alpha}.$$

Раскрывая это уравнение с учетом того, что  $a = \frac{d_k}{2}$  имеем, что

$$EK = \sqrt{\left(1 - \frac{B^2}{d_k^2}\right) \cdot \frac{d_k^2}{4} \cdot \cos^2 \alpha}. \quad (2.22)$$

На основе уравнения (2.20) с учетом (2.21) и (2.22) имеем, что

$$OD = \frac{d_k}{2} \cdot \cos \alpha - \sqrt{\left(1 - \frac{B^2}{d_k^2}\right) \cdot \frac{d_k^2}{4} \cdot \cos^2 \alpha}. \quad (2.23)$$

С учетом (2.23) уравнение (2.19) будет иметь вид:

$$\Delta = \left[ \frac{d_k}{2} \cdot \cos \alpha - \sqrt{\left(1 - \frac{B^2}{d_k^2}\right) \cdot \frac{d_k^2}{4} \cdot \cos^2 \alpha} \right] \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

После упрощения имеем конечное состояние уравнения:

$$\Delta = \frac{d_k}{2} \cdot \sin \alpha - \sqrt{\left(1 - \frac{B^2}{d_k^2}\right) \cdot \frac{d_k^2}{4} \cdot \sin^2 \alpha}. \quad (2.24)$$

При этом длину дуги контакта РПК с деталью можно определить по формуле (2.16), приняв во внимание тот факт, что  $t = \Delta$ , а  $B' = B$ :

$$L_{\Delta} = 2 \cdot \sqrt{\frac{B^2}{4} + \frac{\Delta^2}{\operatorname{tg}^2 \alpha}} + \frac{1}{3} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{B^2}{4} + \frac{\Delta^2}{\operatorname{tg}^2 \alpha}} - B\right). \quad (2.25)$$

Данные, приведенные на рис. 2.11, а, представляют собой зеркальное отражение реальной картины на поверхности детали в увеличенном варианте.

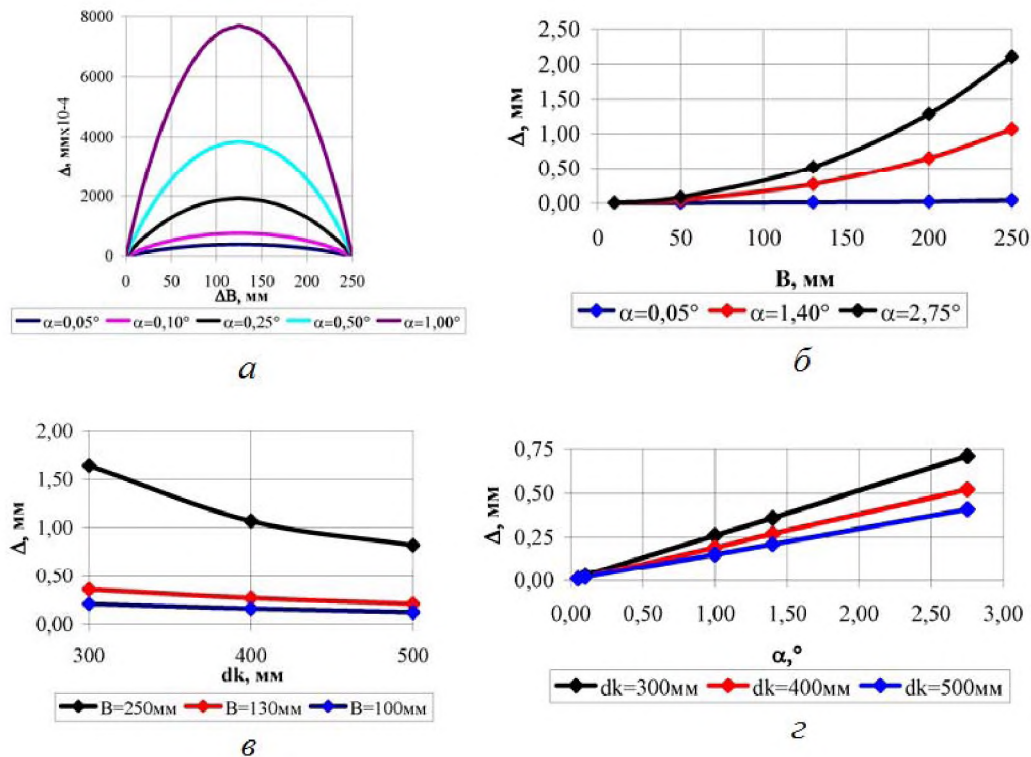


Рисунок 2.11 – Формирование вогнутости по ширине детали и влияние на нее условий обработки ( $\alpha = 1,4^\circ$ ;  $d_k = 400$  мм;  $B = 130$  мм)

Графики зависимости вогнутости  $\Delta$  от условий шлифования, выполненные согласно данным компьютерного моделирования, приведены на рис. 2.11, б – г. Установлено, что функции  $\Delta = f(\alpha)$ ;  $\Delta = f(B)$  и

$\Delta = f(d_k)$  тоже достаточно корректно можно описать степенными зависимостями. Выполненные исследования позволили получить обобщенную степенную зависимость отклонения  $\Delta$  от указанных факторов. Она имеет вид:

$$\Delta = 0,013 \cdot d_k^{-1,196} \cdot \alpha \cdot B^{2,026}. \quad (3.26)$$

В таблице 2.2 приведен фрагмент сравнительных данных согласно разным способам определения вогнутости  $\Delta$ .

Таблица 2.2 – Сравнительные данные согласно разным способам определения вогнутости\*

$\alpha, ^\circ$	0,05	0,25	1	1,5	2,75
$\Delta_{\text{км}}, \text{мм}$	0,038	0,19	0,77	1,15	2,11
$\Delta_{\text{сз}}, \text{мм}$	0,036	0,18	0,72	1,09	1,99
$\Delta_{\text{аз}}, \text{мм}$	0,038	0,19	0,77	1,15	2,11
$\delta, \%$	5,30	5,30	6,50	5,20	5,70

\*  $\Delta_{\text{км}}$  – компьютерное моделирование,  $\Delta_{\text{сз}}$  – степенная зависимость (2.26) [104];  $\Delta_{\text{аз}}$  – аналитическая зависимость (2.24). Общие условия обработки:  $d_k = 400 \text{ мм}$ ;  $t = 0,05 \text{ мм}$ .

Они, во-первых, подтверждают правильность аналитической формулы (2.24), а во-вторых, свидетельствуют о достаточной для практики точности степенной зависимости (2.26), полученной путем математической обработки данных компьютерного геометрического моделирования [18] (в выбранном диапазоне значений параметров условий обработки погрешность не превышает 6 %). Таким образом, чем больше диаметр круга  $d_k$  и меньше значение ширины детали  $B$  и угла наклона  $\alpha$ , тем меньше значение отклонения  $\Delta$  будет иметь место при плоском торцевом шлифовании и наоборот. Наличие вогнутости на поверхности детали следует учитывать на стадии расчета припусков для чистовой и прецизионной стадий шлифования.

Имея значение  $\Delta$ , можно определить количество проходов (i) для ее удаления на чистовых операциях:

$$i = \frac{\Delta_{\max}}{t}. \quad (2.27)$$

Таким образом, зависимости (2.24), (2.26) и (2.27) позволяют технологу корректно назначать условия обработки, обеспечивающие требуемые значения отклонения от плоскостности [104].

#### **2.4. Исследование влияния условий обработки на формирование остаточных гребешков на поверхности детали при многопроходной схеме торцевого шлифования**

Анализ схемы торцевого шлифования на проход (с наклоном оси шпинделя) показал, что в случае обработки широких деталей площадь контакта РПК с обрабатываемой поверхностью может иметь достаточно большие значения, особенно при использовании кругов со сплошным рабочим слоем. Предварительный анализ показывает, что решение проблемы может быть связано с применением многопроходной схемы обработки, то есть с использованием, с одной стороны, предварительного наклона оси шпинделя, а с другой – дополнительной поперечной подачи. Использование последней является еще одним техническим приемом, который позволит существенно снизить площадь контакта РПК с деталью.

Одно из направлений совершенствования этого процесса лежит в плоскости выявления технологических особенностей формирования макро-и микропрофиля на обрабатываемой плоской поверхности детали [104], [105], [108]. В наших исследованиях применялся чисто геометрический подход, то есть считалось, что глубина резания не влияет на формирование профиля детали, с одной стороны, и не учитывалось возможное влияние явлений, связанных с проявлением действия физического фактора (например, упругое восстановление и т.д.), с другой [44].

При многопроходном шлифовании на обрабатываемой поверхности при каждом проходе формируются участки с вогнутостью, вследствие чего на плоской поверхности образуются остаточные гребешки определенной высоты [105], [108] (рис. 2.12 – 2.14). При этом и вогнутость, и остаточные гребешки характеризуются параметром  $H$  (рис. 2.12). Это можно считать

отличными признаками такого процесса в сравнении с обработкой «на проход». На рисунках для удобства принято, что при первом проходе ось круга совпадает с одним из краев детали.

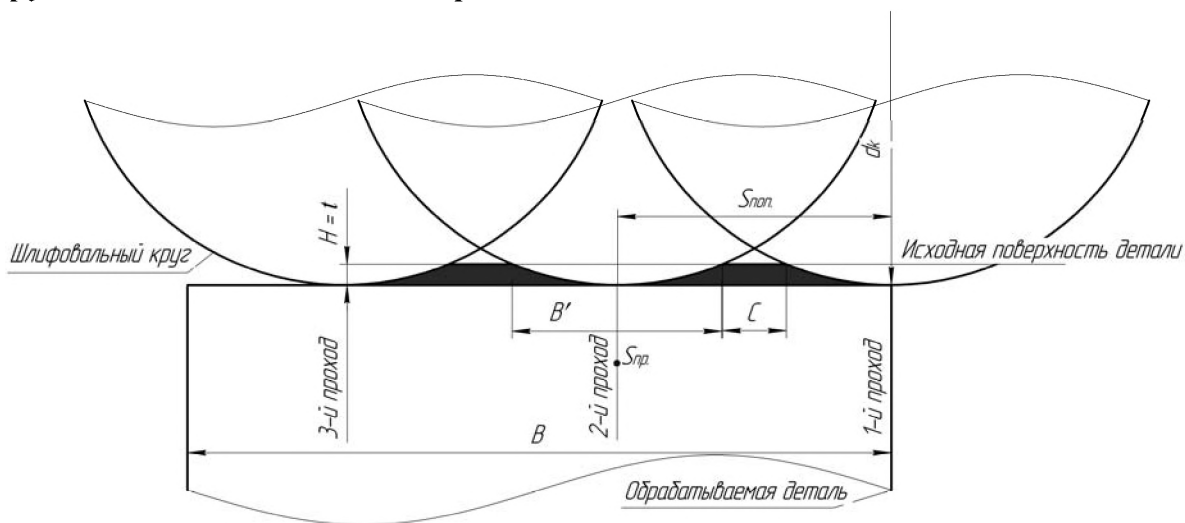


Рисунок 2.12 – К особенностям формирования обрабатываемой поверхности при многопроходном торцевом шлифовании ( $S_{\text{поп}} > B'$ )

Хотя глубина резания непосредственно и не влияет на изменение параметра  $H$ , ее роль проявляется в ограничении его предельных значений.

Предварительный анализ показывает, что величину  $H$  определяют такие факторы, как диаметр круга  $d_k$ , угол наклона шпинделя  $\alpha$  и поперечная подача  $S_{\text{поп}}$ .

Теоретически сочетание их величин обеспечивает нахождение параметра  $H$  в интервале значений  $0 \leq H \leq t$ . Величину поперечной подачи  $S_{\text{поп}}$  удобно выражать в долях ширины обрабатываемой поверхности детали. При этом необходимо за основу брать не всю ширину  $B$ , а ее часть  $B'$ , которая образуется при одном проходе с глубиной шлифования  $t$ , что, как будет показано ниже, позволяет внести определенность при выборе максимального значения  $S_{\text{поп}}$ . Как видно из рис. 2.12, если величина поперечной подачи будет больше указанной выше части  $B'$  ширины детали, то есть  $S_{\text{поп}} > B'$  (рис. 2.12), то высота  $H$  будет максимальной. В данном случае получается, что  $H = H_{\text{max}} = t$ . При этом характерно, что на обработанной поверхности будут оставаться необработанные кругом

участки шириной  $C$ , что недопустимо (если только это не предусмотрено чертежом).

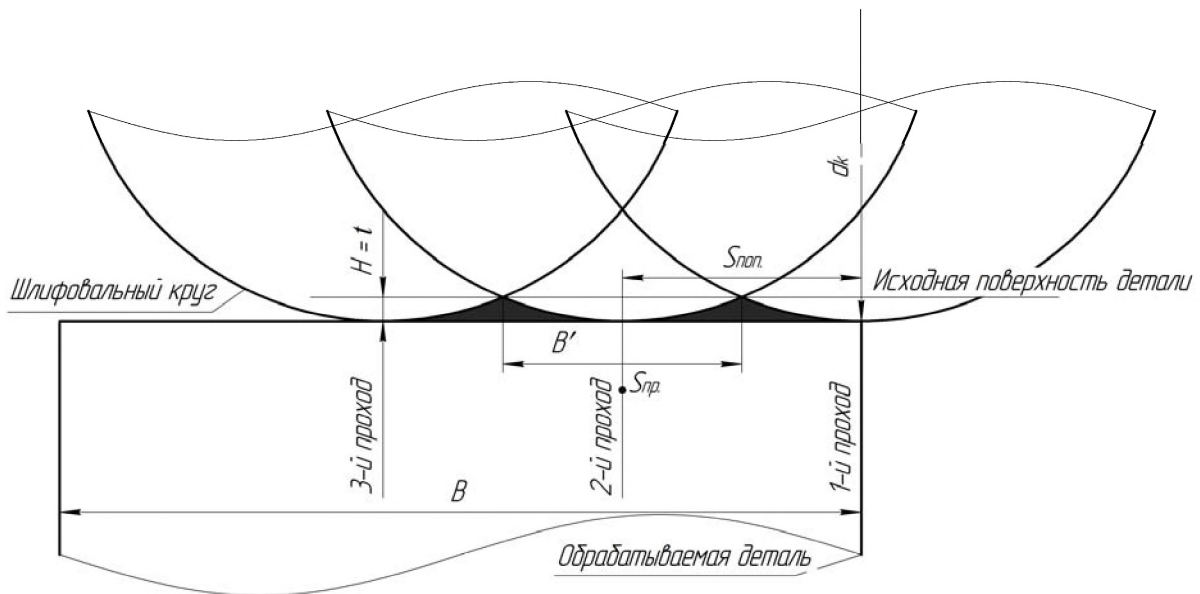


Рисунок 2.13 – К особенностям формирования обрабатываемой поверхности при многопроходном торцевом шлифовании ( $S_{поп} = B'$ )

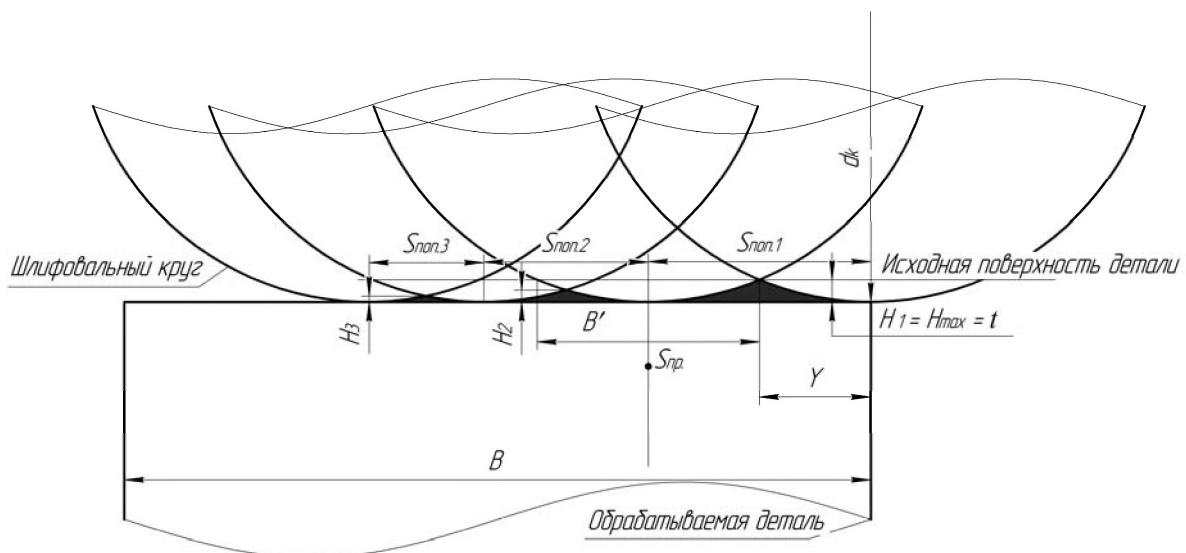


Рисунок 2.14 – Влияние  $S_{поп}$  на высоту остаточных гребешков

$$S_{поп.1} = B', S_{поп.1} > S_{поп.2} > S_{поп.3}$$

Соответственно, для устранения этого недостатка значение поперечной подачи необходимо ограничивать шириной  $B'$ , то есть должно соблюдаться условие:  $S_{\text{поп}} \leq B'$ . Случай, когда  $S_{\text{поп}} = B'$  (рис. 2.13), является теоретически предельным. Здесь, как и в предыдущем примере,  $H = H_{\text{max}} = t$ , участки с необработанной поверхностью будут отсутствовать.

Как видно из рассмотренных рисунков, формирование обрабатываемой поверхности при многопроходном шлифовании имеет некоторое сходство с образованием шероховатости при обработке лезвийным инструментом, в случае, когда в работе участвует круговое переходное лезвие определенного радиуса [44]. Отличие заключается в том, что если при точении продольная подача осуществляется непрерывно, то при многопроходном шлифовании торцом круга ее роль как бы выполняет поперечная подача, которая происходит периодически (мм/дв. х).

В нашем случае вместо кругового лезвия имеем эллипс, что затрудняет выведение математических зависимостей. Теоретически, в зависимости от величины подачи  $S_{\text{поп}}$  такой параметр, как высота остаточных гребешков  $H$ , на поверхности детали может определять в одном случае отклонения формы, а в другом – шероховатость обработки. По мере уменьшения  $S_{\text{поп}}$  высота гребешков будет соответственно уменьшаться (рис. 2.14). Только при угле наклона шпинделя  $\alpha = 90^\circ$ , когда торцевой круг становится как бы периферийным (например, при использовании чашечных цилиндрических кругов), справедливая классическая формула для определения высоты остаточных гребешков, например, при точении [44]:

$$H = r - \frac{\sqrt{4 \cdot r^2 - S^2}}{2}, \quad (2.28)$$

где  $r$  – радиус при вершине резца, мм;  $S$  – продольная подача, мм/об.

В нашем случае (при  $\alpha = 90^\circ$ ) формула (2.28) имеет следующий вид:

$$H = \frac{d_k - \sqrt{4 \cdot \left(\frac{d_k}{2}\right)^2 - S_{\text{поп}}^2}}{2} = \frac{d_k - \sqrt{d_k^2 - S_{\text{поп}}^2}}{2}. \quad (2.29)$$

Поскольку в рассматриваемом процессе шлифовальный круг наклонен под углом  $\alpha$ , значение которого близко к нулю, формула (2.29) дает большие погрешности, что делает ее практически не пригодной для использования. Поэтому возникает необходимость установления зависимости, пригодной для практического использования в условиях плоского торцевого шлифования с наклоном оси шпинделя. Для этого воспользуемся рис. 2.15, который представляет собой два эллипса, смещенных друг от друга на величину поперечной подачи  $S_{\text{поп}}$ .

Здесь  $a$  и  $b$  большая и меньшая полуоси эллипса соответственно. То есть эти эллипсы в данном случае тоже представляют собой проекции окружностей на профильную плоскость (рис. 2., вид Б). Затемненная зона представляет собой остаточный гребешок, формулу для расчета высоты которого и надо получить. Для этого воспользуемся известным подходом, который использовался при выведении формулы для расчета высоты остаточного гребешка при лезвийной обработке с условием, что вершина инструмента (например, резца) выполнена в виде дуги окружности [44]. Как уже отмечалось, в нашем случае это эллипс. На основе схемы, приведенной на рис. 2.15, имеем, что

$$H = AB = OB - OA. \quad (2.30)$$

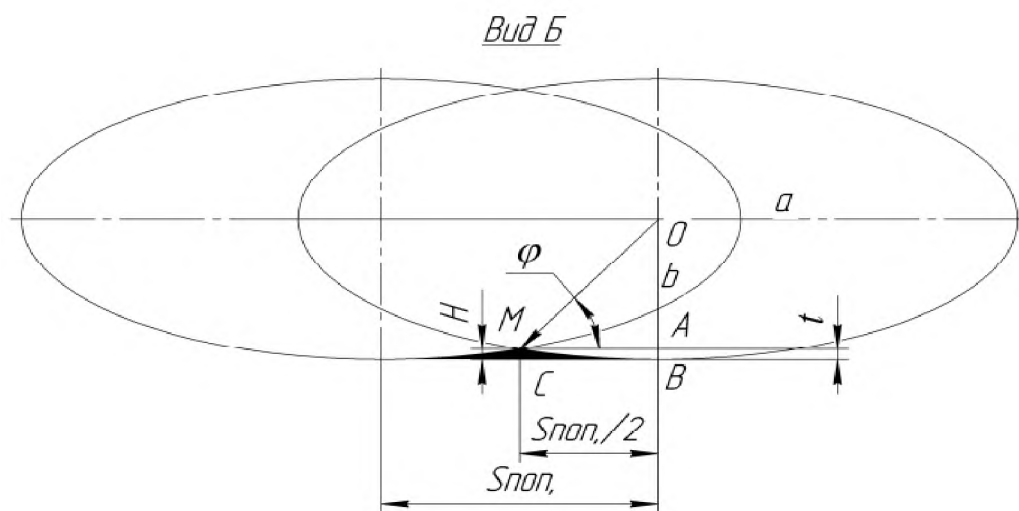


Рисунок 2.15 – Расчетная схема для определения высоты остаточного гребешка [108]



Подчеркнем, что на рис. 2.15 показан крайний случай, когда  $S_{\text{поп}} = B$ . При этом высота остаточных гребешков максимальная и теоретически равна глубине шлифования  $H = t$ . Это в дальнейшем будет иметь важное значение с точки зрения толкования результатов расчетов по определению высоты остаточных гребешков.

Отрезок  $OB$  представляет собой меньшую полуось ( $b$ ) эллипса, которая является величиной неизвестной. Как видно из рис. 2.7 (треугольник  $AOB$ ), ее можно определить, если известны значения большей полуоси эллипса ( $a$ ) и угла наклона ( $\alpha$ ):

$$OB = b = a \cdot \sin \alpha = \frac{d_k}{2} \cdot \sin \alpha. \quad (2.31)$$

Отрезок  $OA$  можно определить из прямоугольного треугольника  $OAM$ . Но для этого надо определить отрезок  $OM$ , который (в отличие от известного случая [44]) представляет собой радиус не окружности, а эллипса в точке  $M$  (расстояние от его центра до данной точки), то есть является величиной переменной. Эта точка совпадает с вершиной остаточного гребешка.

Как известно, формула для расчета этого радиуса имеет вид [1]:

$$r = \frac{a \cdot b}{\sqrt{b^2 \cdot \cos^2 \varphi + a^2 \cdot \sin^2 \varphi}},$$

где  $\varphi$  – угол между радиус-вектором данной точки и осью абсцисс.

Поскольку в данном случае возникает необходимость в определении угла  $\varphi$ , то для упрощения задачи лучше воспользоваться каноническим уравнением (2.4) эллипса [1], [47]:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

где  $x$  и  $y$  – координаты точки  $M$ ; в нашем случае  $x = MA = \frac{S_{\text{non.}}}{2}$ , а  $y = OA$ . На основании уравнения (2.4) с учетом (2.31) имеем –

$$\frac{S_{\text{non.}}^2}{4 \cdot a^2} + \frac{OA^2}{a^2 \cdot \sin^2 \alpha} = 1.$$

Или

$$1 - \frac{S_{\text{поп}}^2}{4 \cdot a^2} = \frac{OA^2}{a^2 \cdot \sin^2 \alpha}.$$

Раскрывая это уравнение, имеем -

$$OA^2 = \left(1 - \frac{S_{\text{поп}}^2}{4 \cdot a^2}\right) \cdot a^2 \cdot \sin^2 \alpha = \left(1 - \frac{S_{\text{поп}}^2}{d_k^2}\right) \cdot \frac{d_k^2}{4} \cdot \sin^2 \alpha.$$

Отсюда следует, что

$$OA = \sqrt{\left(1 - \frac{S_{\text{поп}}^2}{d_k^2}\right) \cdot \frac{d_k^2}{4} \cdot \sin^2 \alpha} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(d_k^2 - S_{\text{поп}}^2)} \cdot \sin \alpha. \quad (2.32)$$

Тогда уравнение (2.30), с учетом (2.31) и (2.32), после несложных преобразований окончательно будет иметь вид:

$$H = \frac{1}{2} \cdot \left[ d_k - \sqrt{(d_k^2 - S_{\text{поп}}^2)} \right] \cdot \sin \alpha. \quad (2.33)$$

По мере увеличения подачи высота  $H$  тоже должна увеличиваться, а после того, как достигнет глубины обработки  $t$ , перестать меняться. Но расчеты по формуле (2.33) при подачах, которые превышают ширину зоны контакта  $B'$ , показывают, что величина остаточных гребешков  $H$  продолжает увеличиваться. То есть точка  $M$ , которая является местом пересечения эллипсов (рис. 2.16), продолжает смещаться в сторону общей оси эллипсов по мере увеличения подачи в зоне  $S_{\text{поп}} > B'$ .

Вид Б

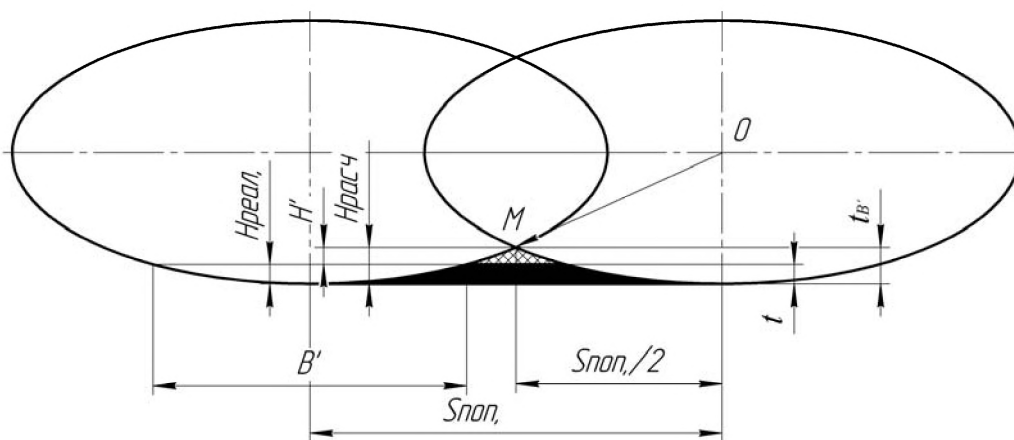


Рисунок 2.16 – К особенностям определения высоты остаточных гребешков

Дело в том, что в этом случае реальное значение высоты остаточных гребешков ( $H_{\text{реал}}$ , затемненная зона) остается неизменным (и не должно превышать глубину шлифования  $t$ ), а расчетное ( $H_{\text{расч}}$ ) увеличивается и численно равно той величине глубины резания  $t_{B'}$ , которая соответствует текущим значениям  $B'$  (поскольку  $B'$  зависит от  $t$ ), а следовательно,  $S_{\text{поп}}$ . То есть расчетное значение высоты включает в свой состав ее реальное значение и несуществующую часть гребешка ( $H'$ , заштрихованная зона). Таким образом, можно записать, что  $H_{\text{расч}} = H_{\text{реал}} + H'$ . Этот подход будет справедливым и в случае определения высоты остаточного гребешка при точении резцом, например, при обработке поверхностей типа винтовой канавки червяка.

Очевидно, что в случае шлифования «на проход» высота  $H$  трансформируется в отклонение от плоскостности (вогнутость)  $\Delta = t_{B'}$ .

Таким образом, применяя формулу (2.30), надо иметь в виду, что в диапазоне поперечных подач  $S_{\text{поп}} \leq B'$  параметр  $H$  представляет собой высоту остаточных гребешков (она не должна превышать глубину обработки  $t$ ), а в диапазоне подач  $S_{\text{поп}} > B'$  вогнутость  $\Delta$ .

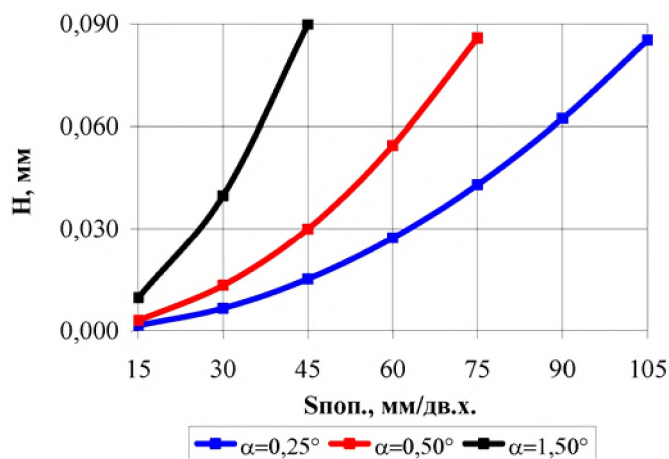
Исследования показали, что функции  $H = f(S_{\text{поп}})$  и  $H = f(d_k)$  достаточно хорошо описываются степенными зависимостями (рис. 2.17). Математическая обработка этих результатов позволила предложить эмпирическую зависимость, которая отражает влияние рассмотренных выше факторов на высоту остаточных гребешков  $H$  (для диапазона глубин  $t \leq 0,1$  мм):

$$H = 0,003 \cdot \alpha \cdot S_{\text{поп}}^{2,039} \cdot d_k^{-0,949} \quad (3.34)$$

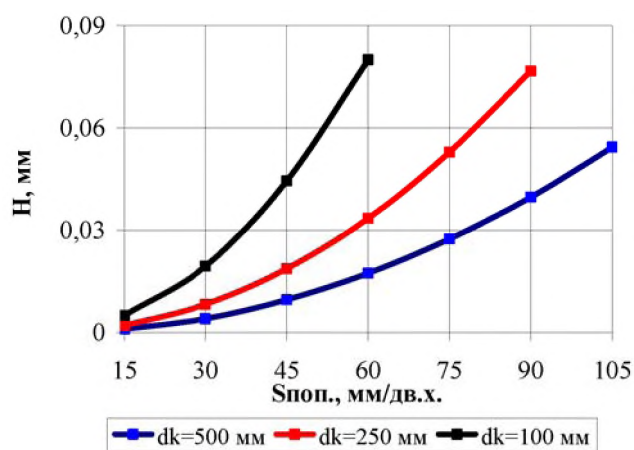
При ее использовании необходимо рассчитывать  $B'$  по зависимости (2.17) и соблюдать условия  $S_{\text{поп}} \leq B'$ .

В таблице 2.3 приведен фрагмент сравнительных данных по разным способам определения высоты остаточных гребешков на поверхности детали.

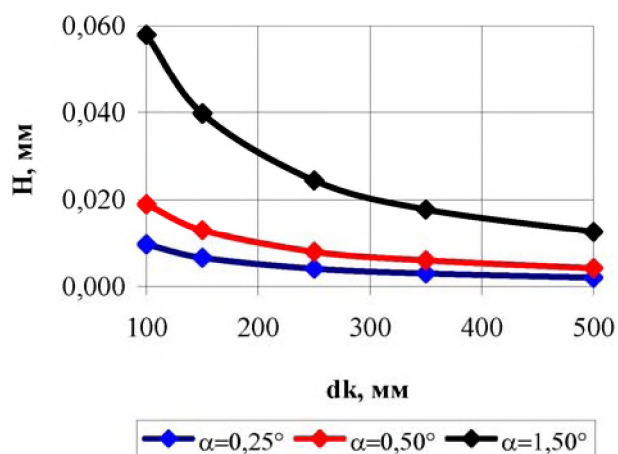
Эти данные свидетельствуют о том, что как аналитическая формула (2.33), так и степенная зависимость (2.34), полученная по данным компьютерного геометрического моделирования, дают практически одинаковые результаты.



$\alpha$



$dk$



$\alpha$

$$H = f(S_{\text{поп}}, \alpha)$$

( $\alpha = 0,25^\circ$ ,  $B' \approx 103$  мм;

$\alpha = 0,50^\circ$ ,  $B' \approx 76$  мм;

$\alpha = 1,5^\circ$ ,  $B' \approx 45$  мм) при

$d_k = 150$  мм,  $t = 0,09$  мм

$$H = f(S_{\text{поп}}, d_k)$$

( $d_k = 500$  мм,  $B' \approx 142$  мм;

$d_k = 250$  мм,  $B' \approx 100$  мм;

$d_k = 100$  мм,  $B' \approx 61$  мм)

при  $\alpha = 0,5^\circ$  та

$t = 0,09$  мм

$$H = f(d_k, \alpha)$$

( $\alpha = 0,25^\circ$ ,  $B' \approx 76$  мм;

$\alpha = 0,50^\circ$ ,  $B' \approx 103$  мм;

$\alpha = 1,50^\circ$ ,  $B' \approx 34$  мм)

при

$$S_{\text{поп}} = 30 \text{ мм/дв. х.},$$

$t = 0,09$  мм

Рисунок 2.17 – Влияние условий обработки на высоту остаточных гребешков

Поэтому обе зависимости имеют право на существование.

Таким образом, мы видим, что многопроходная схема обработки позволяет работать с большими значениями угла  $\alpha$ , а следовательно, с меньшими площадями контакта круга с деталью.

Таблица 2.3 – Сравнительные данные по разным способами определения высоты  $H^*$

$d_k$ , мм	100	150	250	350	500
$H_{км}$ , мм	0,06	0,040	0,024	0,017	0,012
$H_{сз}$ , мм	0,06	0,040	0,025	0,018	0,013
$H_{аз}$ , мм	0,06	0,040	0,024	0,017	0,012

\* $H_{км}$  – компьютерное моделирование;  $H_{сз}$  – степенная зависимость (4.5)[105];  $H_{аз}$  – аналитическая зависимость.

Общие условия:  $\alpha = 1,5^\circ$ ;  $t = 0,09$  мм;  $S_{поп} = 30$  мм/дв. х.

Высоту остаточных гребешков можно существенно снизить даже в случае обработки со значительным наклоном оси шпинделя, если при выхаживании сместить место осуществления  $S_{поп}$  (по ширине детали  $B$ ) например, на величину, равную половине этой линии (чтобы осуществлять процесс шлифования не «по следу»). С помощью такого подхода можно обеспечить повышенные технические требования чертежа по шероховатости и отклонениям формы. При особых требованиях к этим параметрам необходимо применять выхаживание без наклона оси шпинделя ( $\alpha = 0^\circ$ ).

## 2.5. Теоретические расчеты площади контакта круга с деталью при плоском торцевом шлифовании с наклоном оси шпинделя

Известно, что шлифование торцом круга характеризуется относительно большой величиной дугой контакта и поверхности взаимодействия круга с деталью и обуславливает высокие температуры в зоне шлифования [112]. Поэтому площадь контакта может быть принята в качестве параметра для управления теплонапряженностью процесса шлифования. Одним из самых эффективных технологических приемов регулирования площади контакта РПК с деталью является предварительный наклон оси шпинделя станка. Особенности

формирования плоских поверхностей при применении схем обработки «на проход» и в условиях многопроходного шлифования были подробно рассмотрены выше. В то же время анализ литературных источников информации показал, что данные по определению площади контакта торцевого круга с деталью в условиях предварительного наклона оси шпинделя отсутствуют. А это не позволяет технологу в полной мере использовать преимущества такой схемы обработки. Таким образом, теоретические исследования, направленные на установления взаимосвязи площади с параметрами зоны контакта торцевых кругов с деталью, являются актуальными. Рассмотрим подробнее основные возможные схемы контакта РПК с деталью (рис. 3.18 – 3.21).

Площадь контакта РПК с деталью зависит от ряда факторов [107], [110]. К ним в первую очередь следует отнести угол наклона  $\alpha$ , диаметр круга  $d_k$  и глубину обработки  $t$ , определяющие такие линейные параметры зоны контакта РПК с деталью, как длина  $W'$  и ширина  $B'$  (рис. 2.18).

Этот рисунок представляет собой вид «В» рис. 2.7. При определенных условиях как ограничительный фактор, могут выступать, например, ширина РПК, ширина детали и схема обработки (симметричная, несимметричная).

Для определения площади контакта РПК с деталью примем допущение, что длина зоны контакта не превышает ширину РПК, то есть  $W' \leq W$ , а  $d_{min} \leq B \leq d_k$ . В этом случае зона контакта представляет собой часть круга, ограниченную дугой  $FN$  и хордой  $FN$ , то есть сегмент. Как видно из рис.2.19, хорда  $FN = B'$ , а дуга  $FN = L$ .

Существуют несколько способов определения площади сегмента [145]. Воспользуемся тем из них, который основан на использовании данных, уже полученных в этом разделе. Это ширина  $B'$  ( $B$ ), длина  $W'$  и длина дуги  $L$  ( $L_\Delta$ ) зоны контакта РПК с деталью.

Рассматривая площадь сегмента  $S_{сегм}$  как часть площади сектора запишем [145]:

$$S_{сегм} = S_{сект} - S_{треуг.},$$

где  $S_{сект}$  – площадь сектора  $OFN$ ;  $S_{треуг.}$  – площадь треугольника  $OFN$ .

Тогда на основании рис. 2.18 имеем [145], что

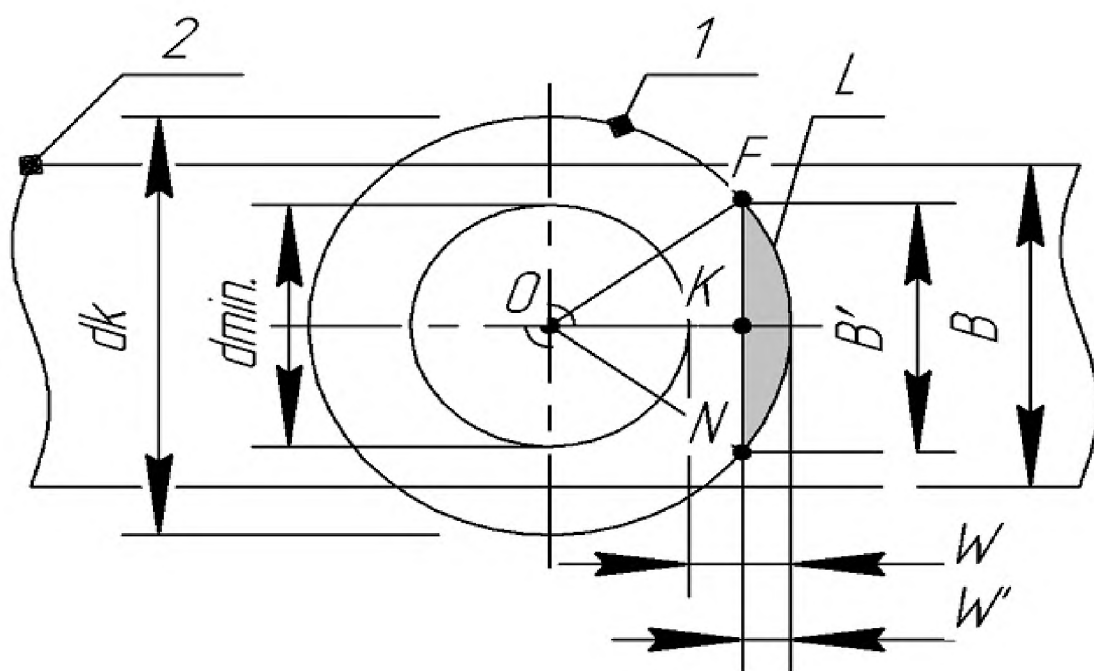


Рисунок 2.18 – Расчетная схема для определения площади контакта РПК (1) с деталью (2) при условии, что  $d_{\min} \leq B \leq d_k$ ,  $B' < B$ , а  $W' \leq W$

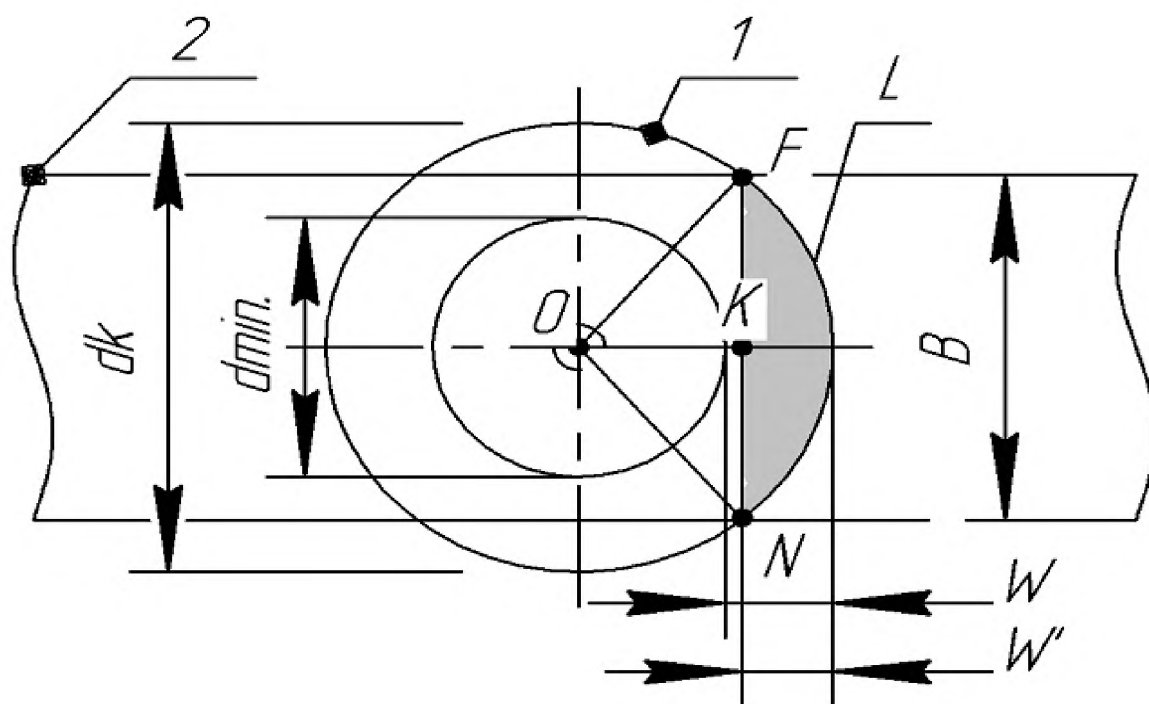


Рисунок 2.19 – Расчетная схема для определения площади контакта РПК (1) с деталью (2) при  $B' = B$





$$S_{\text{сегм}} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{d_k}{2} - \frac{1}{2} \cdot FN \cdot OK.$$

Или после преобразований:

$$S_{\text{сегм}} = \frac{1}{2} \cdot \left[ L \cdot \frac{d_k}{2} - B' \cdot \left( \frac{d_k}{2} - W' \right) \right] \quad (2.35)$$

Параметры  $W'$ ,  $B'$  и  $L$ , которые входят в уравнения (2.35), рассчитываются по выражениям (2.1), (2.11) и (2.16) соответственно.

Схема, представленная на рис. 2.18, справедлива как для случая многопроходного шлифования, так и шлифования «на проход», когда по мере увеличения числа проходов (при осуществлении вертикальной подачи) сохраняется условие, что  $B' < B$ . Но при этом надо учитывать, что с момента, когда круг полностью захватывает поверхность детали по ширине (рис. 2.19),  $B' = B$ , а  $L = L_{\Delta}$  (см. зависимость (2.25)).

В случае, когда  $W \leq W' \leq (d_k - W)$ , РПК может быть подвержена существенным изменениям. Дело в том, что внутренняя кромка круга перестает быть защищенной и на ней будет образовываться заборный конус, размер которого будет зависеть, с одной стороны, от условий обработки, а с другой – от частоты правки РПК, например, алмазным карандашом. Зона контакта будет иметь более сложный вид. Например, на рис. 2.20 показан промежуточный вариант, когда  $W' = \frac{d_k}{2}$ , а  $d_{\min} \leq B < d_k$ .

Площадь контакта можно определить как

$$S_{\text{зк}} = S_{\text{кл}} - S_{\text{сегм}}.$$

Площадь пятна контакта  $S_{\text{зк}}$  (затемненная) будет равняться половине площади кольца ( $S_{\text{кл}}$ ), за исключением площади двух полусегментов (заштрихованы), то есть одного полного сегмента ( $S_{\text{сегм}}$ ), который очерчен дугой  $A\tilde{B}$  и хордой  $AB$ .

Тогда можно записать:

$$S_{\text{зк}} = \frac{\pi}{8} (d_k^2 - d_{\min}^2) - S_{\text{сегм}}. \quad (2.36)$$

Как было показано ранее, для определения площади сегмента надо знать длины дуги  $L_{\text{сегм}}$  и хорды  $AF$ . На основании рис. 2.20 имеем следующее выражение формулы Гюйгенса для определения  $L_{\text{сегм}}$ :

$$L_{\text{сегм}} = A\overset{\sim}{F} = 2 \cdot AM + \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot AM - AF). \quad (2.37)$$

Для определения длины дуги сегмента надо знать отрезки  $AM$  и  $AF$ . Из прямоугольного треугольника  $AMC$  имеем, что

$$AM = \sqrt{AC^2 + MC^2}. \quad (2.38)$$

Отрезок  $MC$  можно определить как

$$MC = \frac{d_k}{2} - \frac{B}{2}. \quad (2.39)$$

Воспользуемся каноническим уравнением окружности:

$$X^2 + Y^2 = R^2.$$

В нашем случае координаты точки  $F$  равны:

$$X = AC = \frac{AF}{2}; Y = \frac{B}{2}; R = \frac{d_k}{2}.$$

Тогда каноническое уравнение окружности можно записать как

$$X^2 + \frac{B^2}{4} = \frac{d_k^2}{4}.$$

Отсюда

$$X^2 = \frac{d_k^2}{4} - \frac{B^2}{4},$$

Или

$$AC = CF = X = \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - \frac{B^2}{4}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(d_k^2 - B^2)}. \quad (2.40)$$

После подстановки уравнений (2.39) и (2.40) в формулу (2.38) имеем, что

$$AM = \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - \frac{B^2}{4} + \left(\frac{d_k}{2} - \frac{B}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - \frac{B^2}{4} + \frac{d_k^2}{4} - \frac{1}{2} \cdot d_k \cdot B + \frac{B^2}{4}}.$$

Раскрывая это уравнение, имеем

$$AM = \sqrt{\frac{d_k^2}{2} - \frac{1}{2} \cdot d_k \cdot B} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot d_k \cdot (d_k - B)}.$$

Тогда на основании (2.37) можно записать, что длина дуги сегмента будет равна:

$$L_{\text{сегм}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot d_k \cdot (d_k - B)} + \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot d_k \cdot (d_k - B)} - 2 \cdot X).$$

Или

$$L_{\text{сегм}} = \sqrt{2 \cdot d_k \cdot (d_k - B)} + \frac{1}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot d_k \cdot (d_k - B)} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(d_k^2 - B^2)}.$$

В конечном итоге получаем, что

$$L_{\text{сегм}} = \frac{4}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot d_k \cdot (d_k - B)} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(d_k^2 - B^2)}.$$

Тогда выражение (2.36) будет иметь вид:

$$S_{\text{зк}} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\min}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{\text{сегм}} \cdot \frac{d_k}{2} - 2 \cdot X \cdot B \right].$$

Или

$$S_{\text{зк}} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\min}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{\text{сегм}} \cdot \frac{d_k}{2} - 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(d_k^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right].$$

Окончательно уравнение будет иметь вид:

$$S_{\text{зк}} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\min}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{\text{сегм}} \cdot \frac{d_k}{2} - \sqrt{(d_k^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right]. \quad (2.41)$$

Надо иметь в виду, что формула (2.41) справедлива только для случая, когда  $W' = 0,5 \cdot d_k$ , а  $d_{\min} \leq B (B') < d_k$ .

В случае, если ширина детали меньше внутреннего диаметра круга, в сегменте с дугой  $K\check{L} = L_{\text{сегм}}$  находится «пустой» сегмент (рис. 2.21, заштрихован) с дугой  $A\check{F} = L_{\text{п.сегм}}$ . Поэтому в уравнении (2.41) следует учитывать площадь «пустого» сегмента, которая определяется по уравнению (2.35). Для ее определения необходимо найти длину дуги этого пустого сегмента:

$$L_{\text{п.сегм}} = A\check{F} = 2 \cdot AM + \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot AM - AF).$$

Из треугольника АОС имеем

$$AM^2 = AC^2 + MC^2.$$

$$AC^2 = AO^2 - OC^2.$$

Из рис. 2.21 следует, что

$$AO = \frac{d_{\min}}{2}; \quad OC = \frac{B}{2}; \quad MC = MO - CO = \frac{d_{\min}}{2} - \frac{B}{2}.$$

Отрезок  $AC$  можно определить как

$$AC^2 = \frac{d_{\min}^2}{4} - \frac{B^2}{4} = \frac{1}{4} \cdot (d_{\min}^2 - B^2).$$

Отсюда

$$AC = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(d_{\min}^2 - B^2)}.$$

Тогда можно записать, что

$$AM^2 = \frac{d_{\min}^2}{4} - \frac{B^2}{4} + \left(\frac{d_{\min}}{2} - \frac{B}{2}\right)^2.$$

Раскрывая последнее уравнение, имеем

$$AM = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (d_{\min}^2 - d_{\min} \cdot B)}.$$

Определяем длину дуги при условии, что  $AF = 2 \cdot AC$ :

$$L_{\text{п.сегм}} = A\overset{\sim}{F} = 2 \cdot AM + \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot AM - AF).$$

$$L_{\text{п.сегм}} = \sqrt{2 \cdot (d_{\min}^2 - d_{\min} \cdot B)} + \frac{1}{3} \cdot (\sqrt{2 \cdot (d_{\min}^2 - d_{\min} \cdot B)} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(d_{\min}^2 - B^2)}).$$

Окончательно можно записать, что

$$L_{\text{п.сегм}} = \frac{4}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot (d_{\min}^2 - d_{\min} \cdot B)} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(d_{\min}^2 - B^2)}. \quad (2.42)$$

Тогда площадь «пустого» сегмента будет равна:

$$S_{\text{п.сегм}} = \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{\text{п.сегм}} \cdot \frac{d_{\min}}{2} - \sqrt{(d_{\min}^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right]. \quad (2.43)$$

Тогда формула для определения площади зоны контакта РПК с деталью будет иметь вид:

$$S_{\text{зк}} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\min}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{\text{сегм}} \cdot \frac{d_k}{2} - \sqrt{(d_k^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right] + S_{\text{п.сегм}}.$$

Или с учетом (2.43) окончательно имеем

$$S_{\text{зк}} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\text{min}}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{\text{сегм}} \cdot \frac{d_k}{2} - \sqrt{(d_k^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right] + \\ + \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{\text{п.сегм}} \cdot \frac{d_{\text{min}}}{2} - \sqrt{(d_{\text{min}}^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right] \cdot K_{\text{п.с}} \quad (2.44)$$

Несмотря на то, что для определения длин дуг сегментов была использована приближенная формула Гюйгенса, погрешность определения площади контакта РПК с деталью не превышает 5 % даже для уравнения (2.44), в котором она употреблена дважды. При малых значениях ширины детали уравнение может давать значительные погрешности. Но это не вызывает особых опасений, так как, во-первых, при обработке деталей с малой шириной площадь небольшая, а во-вторых, такие детали обычно обрабатываются в пакетах и в целом как бы составляют широкие детали.

Таким образом, уравнение (2.44) является универсальным, то есть его можно использовать для случаев, приведенных на рис. 2.20, 2.21, с учетом того, что в первом случае  $K_{\text{п.с}} = 0$ , а во втором  $K_{\text{п.с}} = 1$ .

Если используется схема обработки «на проход», когда при неизменных значениях  $t$  и  $\alpha$  длина  $W' = \text{const}$ , а сам процесс осуществляется без применения поперечной подачи, площадь  $S_{\text{прох}}$  на каждом проходе будет разной благодаря увеличению ширины  $B'$  и длины дуги  $L$  пятна контакта. Для определения  $S_{\text{прох}}$  надо оперировать понятием суммарной глубины обработки на проходах или величиной вогнутости  $\Delta_i$  (рис. 2.22, а). В этом случае рассчитывают площади по одной из приведенных выше формул, предполагая, что глубина на каждом проходе является величиной суммарной и равной соответствующему значению вогнутости. На первом проходе площадь рассчитывается как обычно (как при многопроходной обработке), а для последующих проходов как разницу между суммарной площадью на данном проходе и суммарной площадью предварительного прохода:

$$S_{\text{прох.}i} = S_{\text{прох.}i} / t_{\Sigma i} = \Delta_i / -S_{\text{прох.}i-1} / t_{\Sigma i-1} = \Delta_{i-1} / . \quad (2.45)$$

Согласно рис. 2.22, можно записать, что

$$S_{\text{прох.}1} = S_{\Delta 1}; S_{\text{прох.}2} = S_{\Delta 2} - S_{\Delta 1}; S_{\text{прох.}3} = S_{\Delta 3} - S_{\Delta 2} \text{ и т.д.}$$

Например, если весь припуск снимается за три прохода, а для расчета площади справедлива зависимость (2.35), то при расчетах параметров  $B'$  и  $L$  (зависимости (2.11) и (2.16) соответственно) для первого прохода используем глубину  $t = \Delta_1$ , для второго  $2 \cdot t = \Delta_2$ , третьего  $3 \cdot t = \Delta_3$  и т.д.

Надо иметь в виду, что при расчете параметра  $W'$  (зависимость (2.1)) глубина обработки постоянна и равна  $t = \Delta_1$ . В этом и заключается смысл ограничения площади контакта РПК с деталью.

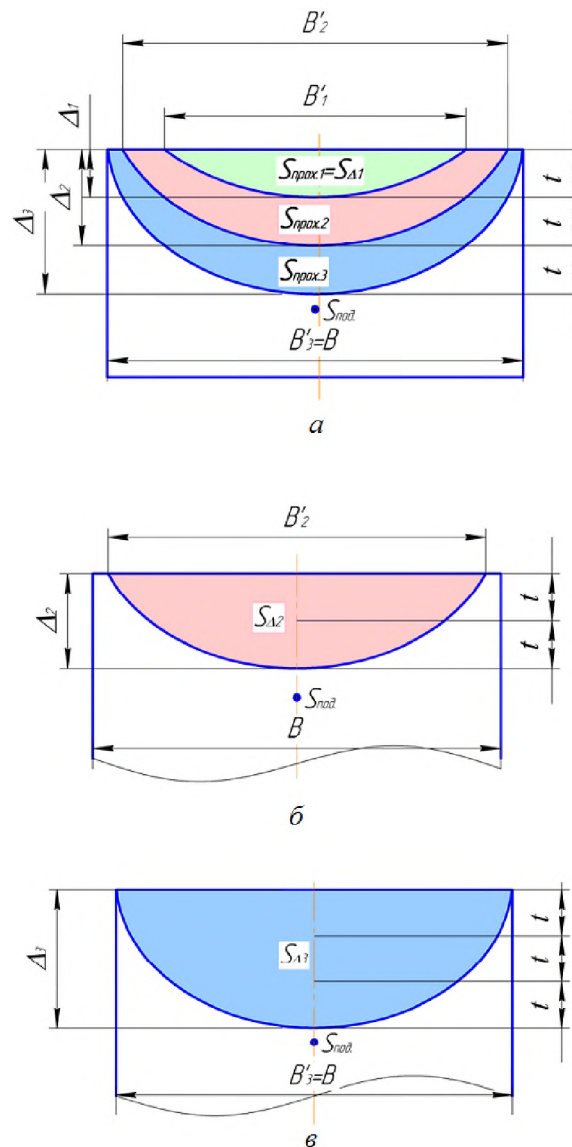


Рисунок 2.22 – К особенностям определения площади контакта РПК с деталью при шлифовании «на проход» ( $t = \text{const}$ ,  $W' = \text{const}$ )

Результаты графического компьютерного моделирования показали (общие условия эксперимента соответствовали наиболее распространенным случаям плоского торцевого шлифования и были такими:  $d_k = d_{k \max} = 400$  мм;  $d_{k \min} = B = 250$  мм;  $t = 0,05$  мм;  $\alpha = 1^\circ$ ), что функции  $S = f(\alpha)$ ,  $S = f(d_k)$  и  $S = f(t)$  можно достаточно корректно описать степенными зависимостями, которые дают наглядное представление о характере и степени влияния факторов на площадь.

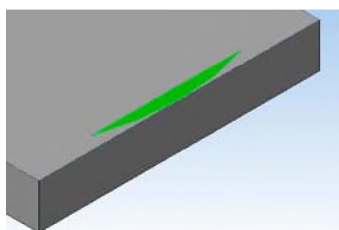
Математическая обработка результатов компьютерных экспериментов с применением метода наименьших квадратов позволила вывести обобщенную зависимость площади контакта  $S$  от условий обработки. Эта зависимость имеет следующий вид:

$$S = 587,10 \cdot \alpha^{-1,49} \cdot t^{1,49} \cdot d_k^{0,49}. \quad (2.46)$$

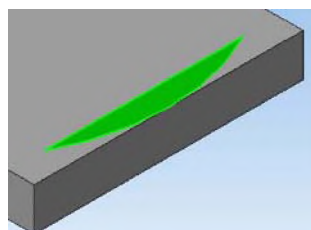
Компьютерное 3D- моделирование показало, что, например, картина изменения площади контакта РПК с деталью по мере увеличения глубины шлифования имеет вид, представленный на рис. 2.23. То есть с увеличением глубины обработки производительность процесса будет увеличиваться за счет существенного увеличения площади контакта РПК с деталью. Это свидетельствует о том, что обработку при  $t = \text{const}$  можно считать дополнительной возможностью управления величиной площади контакта (рис. 2.24). Графики, приведенные на рис. 2.25, наглядно иллюстрируют разницу в значениях площади контакта РПК с деталью при шлифовании по первому (рис. 2.23) и второму (рис. 2.24) подходам.

На первый взгляд это очевидно, но в числовом выражении такие данные приводятся впервые. Они свидетельствуют о том, что в первом случае меняются оба параметра, которые непосредственно влияют на площадь контакта РПК с деталью (то есть длина  $W'$  и длина дуги контакта  $L$ ), а во втором  $W' = \text{const}$  и изменение значения площади происходит за счет увеличения длины дуги контакта  $L$ . В результате площадь контакта во втором случае уменьшается в несколько раз. Это является дополнительным резервом для управления тепловой напряженностью процесса плоского торцевого шлифования.

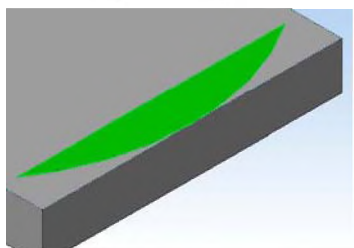
Сравнительный анализ данных расчета площади зоны контакта РПК с деталью, полученных путем компьютерного моделирования и рассчитанных аналитически, показывает, что даже при очень малом



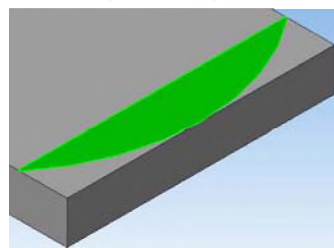
$$a - t = \Delta = 0,01 \text{ мм}; S = 1025 \text{ мм}^2$$



$$б - t = \Delta = 0,02 \text{ мм}; S = 2875 \text{ мм}^2$$

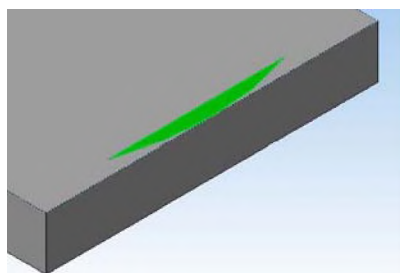


$$в - t = \Delta = 0,03 \text{ мм}; S = 5234 \text{ мм}^2$$



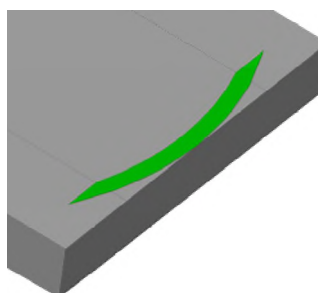
$$г - t = \Delta = 0,04 \text{ мм}; S = 7980 \text{ мм}^2$$

Рисунок 2.23 – 3D-модели, которые отображают влияние глубины шлифования «на проход» на площадь контакта РПК с деталью ( $B = 250 \text{ мм}$ ;  $d_k = 400 \text{ мм}$ ;  $\alpha = 0,05^\circ$ )



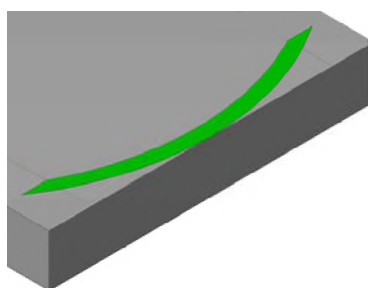
$$a - t = 0,01 \text{ мм}; S = 1025 \text{ мм}^2$$

( $\Delta = 0,01 \text{ мм}$ ; первый проход)



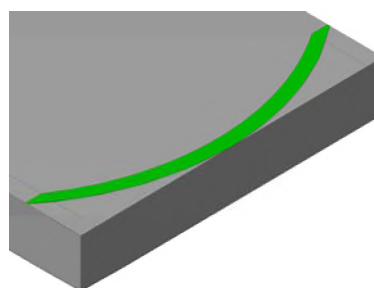
$$б - t = 0,01 \text{ мм}; S = 1850 \text{ мм}^2$$

( $\Delta = 0,02 \text{ мм}$ ; второй проход)



$$в - t = 0,01 \text{ мм}; S = 2360 \text{ мм}^2$$

( $\Delta = 0,03 \text{ мм}$ ; третий проход)



$$г - t = 0,01 \text{ мм}; S = 2746 \text{ мм}^2$$

( $\Delta = 0,04 \text{ мм}$ ; четвертый проход)

Рисунок 2.24 – 3D-модели, отражающие изменение площади контакта РПК с деталью при  $t = \text{const}$  ( $B = 250 \text{ мм}$ ;  $d_k = 400 \text{ мм}$ ;  $\alpha = 0,05^\circ$ )



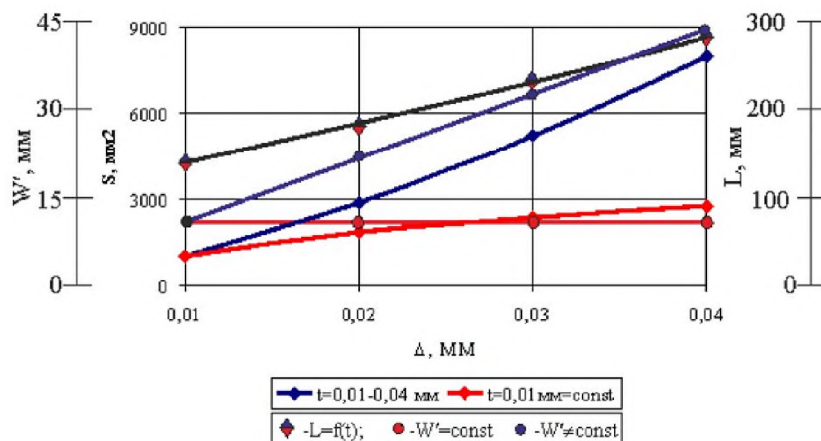
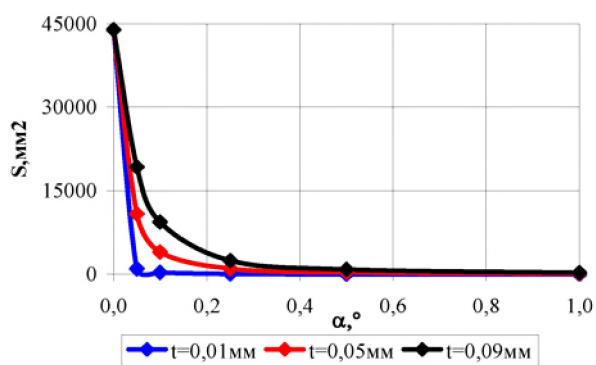


Рисунок 2.25 – Иллюстрация возможности снижения площади контакта РПК с деталью при шлифовании «на проход» ( $B = 250$  мм;  $d_k = 400$  мм;  $\alpha = 0,05^\circ$ )

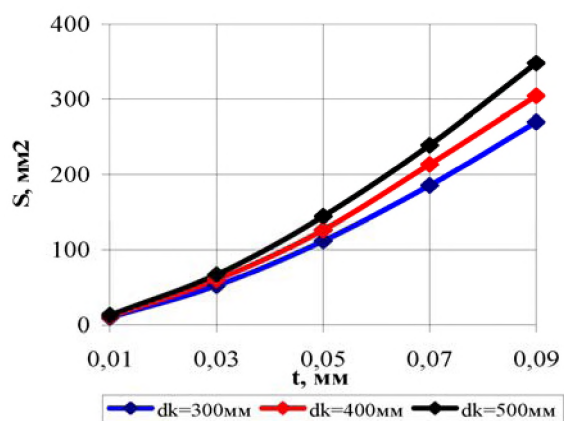
значении угла наклона оси шпинделя ( $\alpha = 0,05^\circ$ ) погрешность между экспериментальными и расчетными данными не превышает 2 %. Графики зависимостей, отражающих влияние условий обработки на площадь, приведены на рис. 2.26. Их анализ показывает, что предварительный наклон оси шпинделя на угол  $\alpha$  позволяет в достаточно широких пределах управлять значением площади  $S$ . Наиболее резкое изменение площади имеет место в зоне малых значений углов предварительного наклона оси шпинделя ( $\alpha < 0,25^\circ$ ) по причине соответствующего изменения ширины и длины зоны контакта РПК с деталью. С одной стороны, как уже отмечалось, при значительной площади в зоне контакта РПК с деталью могут развиваться высокие температуры. Но такие значения углов  $\alpha$  характерны, как правило, для чистового шлифования (которое, как известно, реализуется с малыми глубинами обработки).

## 2.6. Практические рекомендации по применению результатов теоретических исследований на производстве

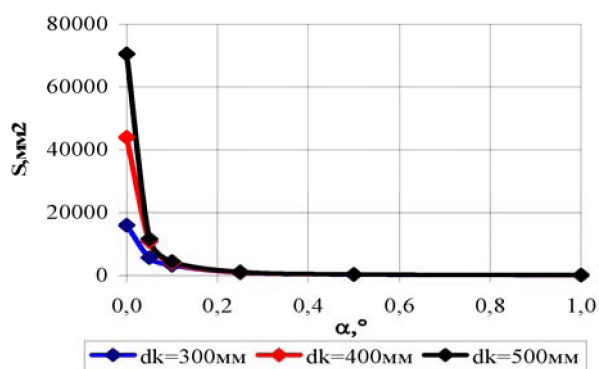
*Разработка способа плоского торцевого шлифования, основанного на регламентировании вогнутости (способ 1, патент № 92792, Украина).* Неопределенность величины угла наклона шпинделя при плоском торцевом шлифовании может привести (особенно в случае обработки



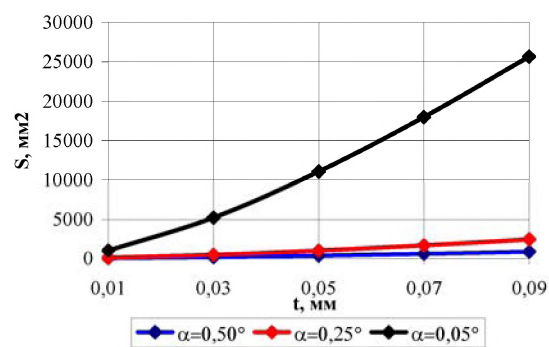
$$a - S = f(\alpha, t)$$



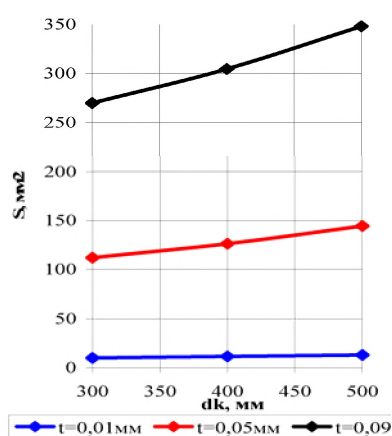
$$б - S = f(\alpha, d_k)$$



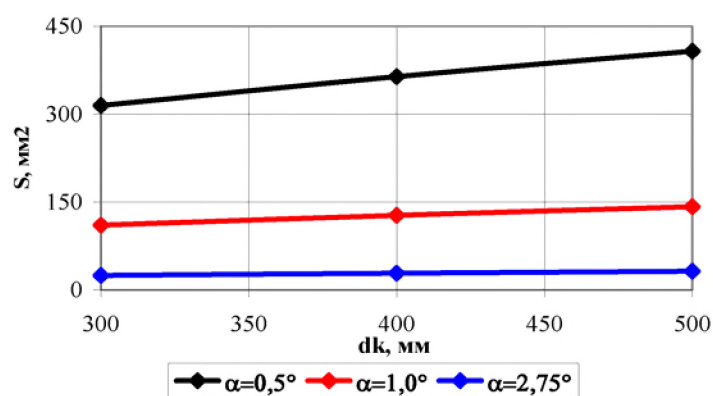
$$в - S = f(t, d_k)$$



$$г - S = f(t, \alpha)$$



$$д - S = f(d_k, t)$$



$$ж - S = f(d_k, \alpha)$$

Рисунок 2.26 – Графики зависимостей площади контакта РПК с деталью от условий обработки

значительных по ширине поверхностей деталей) к появлению недопустимых значений отклонения от плоскостности. Для решения этого вопроса можно воспользоваться результатами исследований, приведенными в подразделе 2.3. На основе формулы (2.26) имеем, что величина угла  $\alpha$  при конкретных значениях  $d_k$ ,  $B$  и технических требований чертежа к отклонению  $\Delta$  (то есть его предельно допустимой величины  $[\Delta]$ ) должна подчиняться зависимости

$$\alpha \leq \frac{[\Delta]}{0,013 \cdot d_k^{-1,196} \cdot B^{2,026}}. \quad (2.47)$$

Это позволяет на практике для конкретной технологической операции (предварительная, чистовая или прецизионная) при известных значениях диаметра круга и ширины обрабатываемой поверхности определить максимально допустимое значение угла  $\alpha$ , при котором отклонение от плоскостности будет находиться в допустимых пределах, а следовательно, избежать брака шлифованных изделий по этой причине.

Кроме этого, становится возможной и обратная задача – определение величины угла  $\alpha$  (при известных  $d_k$ ,  $B$ ) в случае необходимости шлифования поверхностей с заранее заданной вогнутостью (профильное шлифование). Все это позволяет существенно расширить технологические возможности процесса плоского торцевого шлифования в целом.

Здесь следует отметить, что вывести неравенство типа (2.47) путем использования аналитических зависимостей достаточно сложно.

Для проверки способа были проведены лабораторные испытания. Обрабатывали одноразовым шлифованием детали из стали 45X (HRC 45) различной ширины (по очереди). В качестве инструмента был принят чашечно-цилиндрический круг 6 200x63x32x13x18 24A 25CT1 K по ГОСТ 2424 – 83. Внутренний диаметр круга составлял 165 мм, что превышает ширину избранных деталей. Режимы шлифования (с охлаждением):  $V_k = 30$  м/с;  $S_{np} = 0,5$  м/мин;  $S_{поп} = 0,01$  мм/дв. х

Допустимые ( $[\Delta]$ ) и экспериментальные ( $\Delta$ ) значения отклонений от плоскостности для существующего и предлагаемого способов приведены в таблице 2.4.

В ней также приведены рассчитанные (для предлагаемого способа шлифования) значения углов  $\alpha$  для каждой ширины детали.

Таблица 2.4 – Результаты экспериментов

№ п/п	Способ шлифования	Ширина детали В, мм			Примечание
		100	125	150	
1	Существующий	$\alpha=0,57^0$	$\alpha=0,57^0$	$\alpha=0,57^0$	Технические условия не выдерживаются
		$\frac{[0,15]}{0,1}$	$\frac{[0,20]}{0,15}$	$\frac{[0,3]}{0,2}$	
2	Предложенный	$\alpha=0,39^0$	$\alpha=0,37^0$	$\alpha=0,34^0$	Технические условия выдерживаются
		$\frac{[0,1]}{0,1}$	$\frac{[0,15]}{0,15}$	$\frac{[0,2]}{0,2}$	

*Разработка способа плоского торцевого шлифования, основанного на регламентировании высоты остаточных гребешков на поверхности детали (способ 2, патент № 95449, Украина). Способ основан на данных ранее выполненных исследований. Предложен следующий подход к определению необходимой величины поперечной подачи в зависимости от вида обработки.*

Выбор значения подач на предварительной ( $S_{\text{поп.п}}$ ) и чистовой ( $S_{\text{поп.ч}}$ ) стадиях шлифования, базируется на формулах (2.17) и (2.34) соответственно и должны удовлетворять неравенствам:

$$S_{\text{поп.п}} \leq B' \leq 14,92 \cdot t^{0,50} \cdot \alpha^{-0,48} \cdot d_k^{0,50}; \quad (2.48)$$

$$S_{\text{поп.ч}} \leq \sqrt[2,039]{\frac{[H]}{0,003 \cdot \alpha \cdot d_k^{-0,949}}}. \quad (2.49)$$

Значение поперечной подачи, рассчитанное по формуле (2.48), гарантированно обеспечивает на этапе предварительной обработки отсутствие на обработанной поверхности участков, которые будут оставаться необработанными кругом. Значение поперечной подачи, рассчитанное по формуле (2.49), позволяет обеспечить на этапе чистовой обработки нужный уровень высоты остаточных гребешков  $H$ .

Для практической проверки предлагаемого способа шлифования обрабатывали детали из стали 45Х (HRC 45) шириной 150 мм. В нашем случае был принят чашечно-цилиндрический круг 6 200х63х32х13х18 24А

25СТ1 К по ГОСТ 2424 – 83. Внутренний диаметр круга составлял 165 мм. Режимы шлифования (с охлаждением):  $V_k = 30$  м/с;  $S_{пр} = 0,5$  м/мин,  $S_b = 0,01$  мм/дв.х. Значение поперечной подачи ( $S_{поп}$ , мм/дв.х), угла наклона оси вращения шпинделя и глубины шлифования приведены в таблицах 2.5 и 2.6.

Таблица 2.5 – Результаты экспериментов (предварительное шлифование)

Способ шлифования	$t$ , мм	$\alpha$ , °	$S_{поп}$ , мм/дв.х.	$d_k$ , мм	Наличие участков нетронутых кругом
Существующий	0,05	1	50	200	есть
Предложенный	0,05	1	47	200	нет

Таблица 2.6 – Результаты экспериментов (чистовое шлифование)\*

Способ шлифования	$t$ , мм	$\alpha$ , °	$S_{поп}$ , мм/дв.х.	$d_k$ , мм	$[H]$ , мм	$H$ , мм
Существующий	0,01	0,25	30	200	0,00025	0,005
Предложенный	0,01	0,25	15	200	0,00025	$\frac{0,001^*}{0,002}$

\*Примечание: в числителе приведено расчетное, а в знаменателе – реальное значение параметра  $H$ .

Данные экспериментов свидетельствуют о том, что использование предложенного способа (в отличие от существующего) позволяет гарантированно обеспечить отсутствие на поверхности детали участков, необработанных кругом. Изменением поперечной подачи можно влиять на величину остаточных гребешков и тем самым расширить технологические возможности процесса шлифования в целом.

*Разработка способа плоского торцевого шлифования, основанного на регламентировании площади контакта РПК с деталью (способ 3, патент № 106941, Украина). Согласно предложенному способу, допустимое значение площади контакта РПК с деталью определяют отдельно для предварительной и чистовой обработок, например, по*

температурному фактору, а минимальную величину угла  $\alpha$  рассчитывают по зависимости

$$\alpha_{\min} = \frac{71,62 \cdot t \cdot d_k^{0,33}}{[S]^{0,67}}. \quad (2.50)$$

Связь площади контакта РПК с деталью и температурой обработки может быть установлена путем теоретических расчетов или экспериментальных исследований [116], [127].

Для проверки предложенного технического решения осуществляли чистовую обработку шлифованием (с охлаждением) детали шириной 250 мм из стали 45X (HRC 45) по многопроходной схеме обработки.

Условия шлифования: круг ЧЦ 6 300x100x127x180x75 24А 25 СТ1 К,  $t=0,01$  мм;  $S_{\text{пр}}=1$  м/мин.

Согласно рекомендациям, для существующего способа значение угла наклона для черновой обработки должно обеспечивать зазор на противоположной стороне круга  $\delta = 0,05$  мм. Для принятого диаметра круга угол наклона оси шпинделя равен  $\alpha = 0,6'$ , а площадь контакта РПК с деталью составляет  $S=9605$  мм<sup>2</sup>. Допустимая площадь контакта  $[S] = 80$  мм<sup>2</sup>, что соответствует значению угла  $\alpha = 15'$  (согласно расчетам с применением предложенной выше зависимости).

Исследования методом травления показали наличие дефектного слоя, обусловленного действием температурного фактора, при шлифовании согласно прототипу и его практическое отсутствие в случае использования предлагаемого способа шлифования.

*Совместное использование предложенных способов плоского торцевого шлифования.* При шлифовании «на проход» в зависимости от конкретных обстоятельств одновременно используют ограничения (2.47) и (2.50). То есть

$$\alpha \geq \frac{71,62 \cdot t \cdot d_k^{0,33}}{[S]^{0,67}}; \alpha \leq \frac{[\Delta]}{0,013 \cdot d_k^{-1,196} \cdot B^{2,026}}$$

При многопроходном шлифовании в зависимости от конкретных обстоятельств одновременно используют ограничения (2.48), (2.49) и (2.50).

То есть

$$S_{\text{пол.ч}} \leq \sqrt[2,039]{\frac{[H]}{0,003 \cdot \alpha \cdot d_k^{-0,949}}}; S_{\text{non.n.}} \leq B' \leq 14,92 \cdot t^{0,50} \cdot \alpha^{-0,48} \cdot d_k^{0,50};$$

$$\alpha \geq \frac{71,62 \cdot t \cdot d_k^{0,33}}{[S]^{0,67}}$$

## Выводы

1. Установлено наличие существенного противоречия между литературными рекомендациями по выбору угла предварительного наклона оси вращения шпинделя при реализации процесса плоского торцевого шлифования. Они отличаются от нескольких до десятка раз. Так, в диапазонах значений рекомендуемых зазоров между РПК и деталью ( $\delta=0,05 - 2$  мм) в интервале наиболее распространенных диаметров круга ( $d_k=150 - 500$  мм) величина угла не превышает один градус. В то же время в соответствии с другими рекомендациями она должна составлять  $2 - 4^\circ$ .

2. Параметры зоны контакта РПК с деталью (длина, ширина, длина дуги и площадь) при реализации глубинной схемы обработки определяются в основном несколькими факторами, а именно: углом предварительного наклона оси вращения шпинделя, глубиной шлифования, диаметром круга и шириной детали. Варьируя значениями факторов, можно в широком диапазоне изменять эти параметры (от минимального значения до полного контакта), а следовательно, и тепловую напряженность процесса обработки.

3. Для обеспечения технических требований по отклонению от плоскостности при реализации глубинной схемы обработки «на проход» нужно иметь четко определенную величину угла наклона  $\alpha$ , причем с учетом того, что на отклонение формы плоской поверхности, кроме него, влияют наружный диаметр торцевого круга, а также ширина обрабатываемой поверхности детали. Это можно считать особенностью рассматриваемого процесса, т.к. в случае обработки без наклона оси шпинделя теоретически последние два параметра не влияют на отклонение формы.

4. Анализ глубинной схемы плоского торцевого шлифования «на проход» (с наклоном оси шпинделя) показал, что в случае обработки

широких деталей площадь контакта РПК с обрабатываемой поверхностью может иметь достаточно большие значения, особенно при использовании кругов со сплошным рабочим слоем. В связи с этим решение проблемы снижения площади может быть связано с применением многопроходной схемы обработки (с использованием дополнительной поперечной подачи).

5. С точки зрения качества обрабатываемой поверхности ключевым моментом при реализации многопроходной схемы обработки является согласованность между величинами поперечной подачи и ширины контакта РПК с деталью. Это дает возможность управлять значением высоты остаточных гребешков на ее поверхности и не допускать появления зон, не обработанных кругом. Остаточные гребешки можно рассматривать как совокупное проявление вогнутости на каждом проходе круга.

6. Компьютерное геометрическое моделирование подтвердило корректность полученных аналитических зависимостей для определения параметров зоны контакта РПК с деталью, а также обеспечило визуализацию полученных данных.

7. Подтверждено, что предварительный наклон оси шпинделя на угол  $\alpha$  позволяет в достаточно широких пределах управлять значениями отклонения от плоскостности, высоты остаточных гребешков и площади контакта РПК с деталью. Наиболее резкое изменение площади контакта РПК с деталью имеет место в зоне малых значений углов предварительного наклона оси шпинделя ( $\alpha < 0,25^\circ$ ).

8. Предложены способы плоского торцевого шлифования, основанные на определении углов предварительного наклона оси шпинделя с использованием полученных степенных зависимостей (патенты №№ 92792, 95449, 106941, Украина). В качестве параметров, допустимые значения которых регламентируются, могут выступать площадь контакта РПК с деталью, отклонение от плоскостности, высота остаточных гребешков на обрабатываемой поверхности, причем как отдельно, так и совместно друг с другом. Они дают технологам возможность корректного определения условий практической реализации процессов плоского торцевого шлифования.



9. Полученные степенные зависимости для определения параметров зоны контакта РПК с деталью органично дополняют аналитические формулы и являются достаточно удобными для применения в производственных условиях.

10. Значительную часть результатов, полученных в данном разделе, можно использовать для целенаправленного создания на поверхности детали вогнутости или остаточных гребешков, если это специально предусмотрено чертежом.

11. Полученные результаты дают технологу новые возможности для разработки технологических операций плоского шлифования и в значительной степени создают предпосылки для повышения эффективности этого процесса.

12. Часть выполненных исследований может быть использована применительно к обычной (неглубинной) схеме шлифования, а также торцевому фрезерованию с предварительным наклоном оси шпинделя. Последнее, как известно, позволяет в некоторых пределах управлять износом режущих элементов фрезы.

### **3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРАВКИ АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ АЛМАЗНЫМИ КАРАНДАШАМИ**

*Исходя из того, что состояние РПК существенно влияет на теплонапряженность процесса шлифования, а также то, что для его обеспечения преимущественно используются карандаши из природного алмаза, применен комплексный подход к обеспечению показателей процесса правки РПК алмазными карандашами из СПА на уровне природных алмазов. Он состоит в создании соответствующих условий как на этапе изготовления правящего карандаша с СПА, так и на этапе его эксплуатации. На этапе изготовления карандаша предложен метод предварительной оценки абразивной способности СПА. Решение задачи на этом этапе применительно к условиям высокотемпературного закрепления СПА в державке стало возможным благодаря использованию методологии 3D- моделирования НДС системы «СПА –металлофаза – металлическое покрытие», которая позволила установить определяющую роль металлофазы в СПА, температуры плавления припоя и наличия металлического покрытия на алмазе. На этапе эксплуатации правящего карандаша задача была решена благодаря реализации процесса правки круга в сплошном слое ТЖ.*

#### **3.1. Определение путей повышения ресурса правящих карандашей из синтетических поликристаллических алмазов**

Известно, что процессы шлифования широко используются для окончательной обработки ответственных поверхностей изделий из различных ОМ. Одной из важных задач, с которой имеет дело технолог при разработке технологической операции шлифования, является правка РПК. Благодаря улучшению режущих свойств круга своевременная и эффективная правка РПК в значительной степени влияет на силовую и тепловую напряженность процесса обработки в целом [53], [54], а следовательно, и на эффективность процесса шлифования в целом.

Правка абразивных кругов – это одна из наиболее распространенных областей использования как монокристаллов (природных и синтетических), так и СПА. Задачу повышения эффективности процесса

правки абразивных кругов можно разделить на два основных направления. Первое направление связано с совершенствованием методов определения оптимальных условий на этапе изготовления алмазных карандашей, а второй – на этапе их эксплуатации (рис. 3.1).

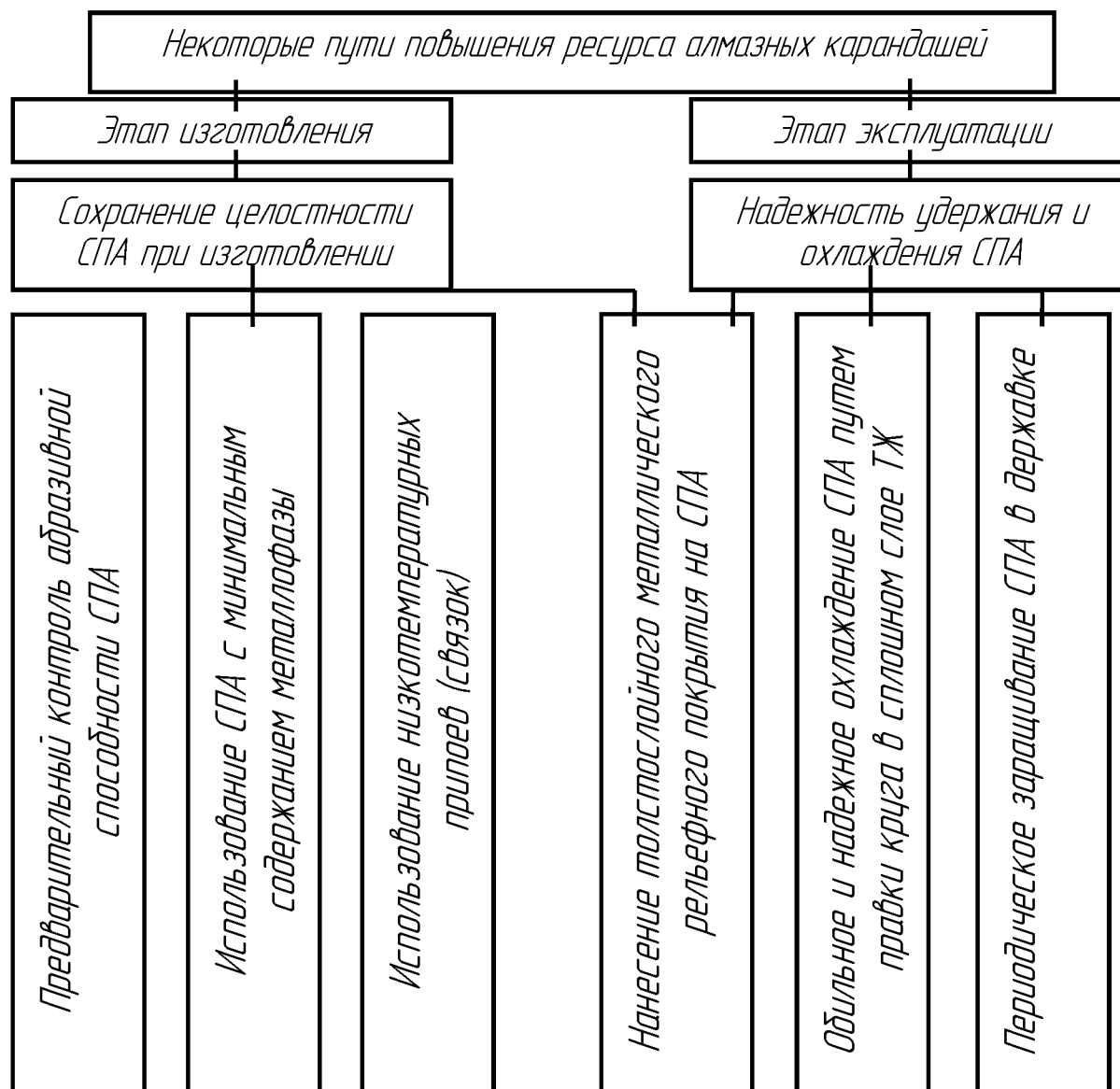


Рисунок 3.1 – Основные пути повышения ресурса алмазных карандашей

Одними из эффективных подходов к решению задачи уменьшения количества бракованных карандашей могут быть следующие. Во-первых, предварительный контроль абразивной способности СПА; во-вторых, использование СПА с допустимым процентом металлических включений; в-третьих, нанесение на алмаз толстослойного металлического рельефного

покрытия; в-четвертых, за счет подбора материала припоя с определенными физико-механическими свойствами (температура плавления, износостойкость и т. д.). В последнем случае существует некоторое противоречие между температурой плавления припоя и его износостойкостью. Если припой не износостойкий, то СПА быстро «обнажается» в державке, и прочность его закрепления уменьшается. Поэтому в случае использования низкотемпературных припоев возникает необходимость «заращивания» СПА в державке или защищать припой от воздействия абразивного износа, например, за счет создания на поверхности припоя (металлической связки) износостойкого композиционного покрытия [96].

Как правило, более износостойкие припои имеют более высокую температуру плавления. Поэтому было высказано предположение, что, благодаря использованию СПА с металлической оболочкой (покрытием), в структуре которых содержится минимально допустимое количество металлической фазы, можно будет использовать высокотемпературные износостойкие припои.

Поскольку основная часть из рассмотренных вопросов требует более детального знания физики процессов, происходящих при изготовлении карандашей, то ответ можно получить путем использования компьютерного 3D- моделирования системы «СПА – металлофаза – металлическое покрытие», выполненного, например, в программном пакете типа COSMOS, основанном на использовании МКЭ. Это в первую очередь касается влияния таких составляющих, как физико-механические свойства и толщина металлического покрытия, количество металлической фазы в СПА и ее физико-механические свойства, физико-механические свойства самого СПА, припоя и т.д.

## **3.2. Обеспечение высокой работоспособности алмазных карандашей из СПА на этапе их изготовления**

### *3.2.1 Особенности оценки уровня абразивной способности синтетических поликристаллических алмазов*

Алмазные правящие карандаши должны проходить хотя бы выборочный контроль на абразивную способность. Существует несколько

способов такого контроля. Так, например, согласно ГОСТ 607 – 80, абразивная способность алмазных карандашей оценивается с помощью удельной производительности ( $\text{см}^3/\text{мГ}$ ), которая, по сути, является прямым критерием. Значение удельной производительности определяется по выражению

$$Q = \frac{V_a}{P_a}, \quad (3.1)$$

где  $V_a$  – объем абразива, снятого при правке круга,  $\text{см}^3$ ;  $P_a$  – вес алмаза, затраченного при правке круга, мГ.

Стандартные испытания по оценке абразивной способности алмазных карандашей проводились (с учетом требований ГОСТ 607 – 80) на круглошлифовальном станке мод. 3У12 на следующих режимах: скорость шлифовального круга  $V_k = 35$  м/с; скорость продольной подачи  $S_{\text{пр.}} = 0,5$  м/мин; поперечная подача  $S_{\text{поп.}} = 0,03$  мм/ход; производительность подачи эмульсии в зону правки 20 л/мин. Износ алмаза в правящем карандаше оценивался весовым методом на аналитических весах ВЛА-200 г 2-го класса. Алмаз запаивался в державке с вылетом над уровнем торца державки. При правке торцевых кругов линейный износ алмаза дополнительно контролировался с помощью рычажной скобы СР50 мод. 01102 (ТУ2 – 034 – 0221197 – 012-91) с ценой деления 0,001 мм (поскольку площадь сечения СПА можно было сохранить неизменной). Для настройки скобы был задействован комплект плоскопараллельных концевых мер длины 2-го класса точности (ГОСТ 9038 – 90).

После этого выполняли расчет веса СПА, который был изношен:

$$P_a = S_a \cdot (l_1 - l_2) \cdot \rho,$$

где  $S_a$  – площадь сечения СПА,  $\text{мм}^2$ ;  $l_1, l_2$  – соответственно длина карандаша до и после эксперимента, мм;  $\rho$  – плотность СПА,  $\text{мГ}/\text{мм}^3$ .

Линейный износ абразивных кругов измерялся с помощью штангенциркуля ШЦ – II – 250 – 0,05 ГОСТ 166 – 89. На его основе рассчитывали изношенный объем кругов.

Поскольку значения параметров, входящих в формулу (3.1), определяются экспериментальным путем, для этого нужны достаточно длительные испытания.

Определенный интерес представляют методы определения абразивной способности СПА путем использования и других критериев оценки [36], [46], в том числе и косвенных. В работах [45] и [36] предложены некоторые варианты решения по данному вопросу (рис. 3.2). Одним из них является использование плотности СПА в качестве косвенного критерия оценки абразивной способности [36]. На это впервые указано в работе акад. Верещагина Л.Ф. [36]. Для определения плотности использовали смесь жидкости Клеричи с водой, а плотность таких растворов определяли с помощью реперов плотности.

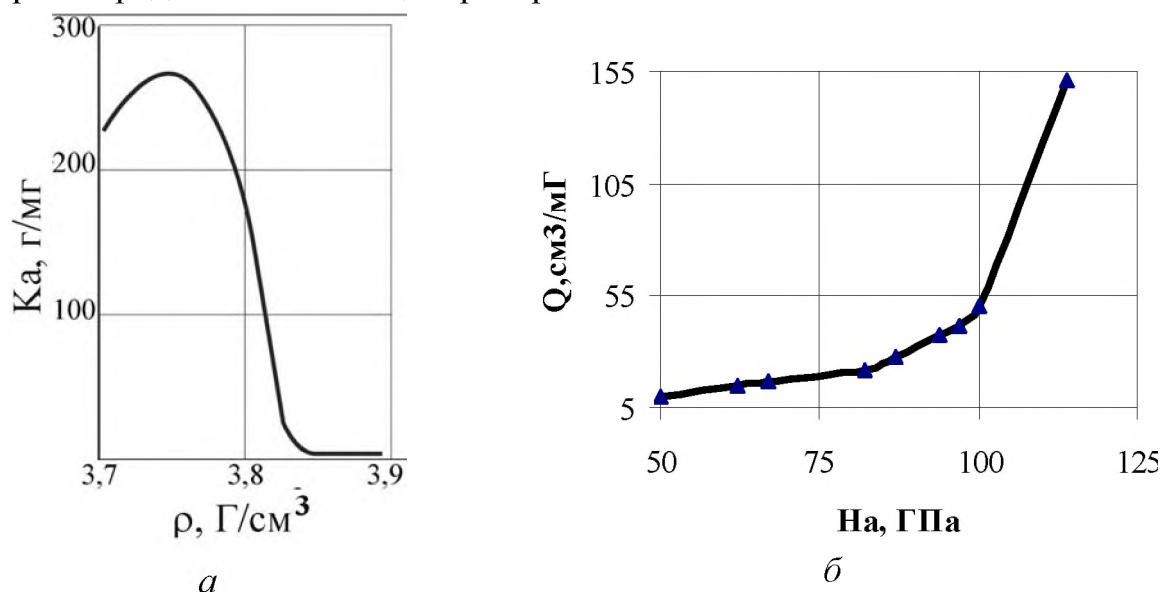


Рисунок 3.2 – Зависимость  $K_a = f(\rho)$  [36] (а) и  $Q = f(H_a)$  [45] (б)

Установлено, что плотность изученных алмазных агрегатов с микроструктурой карбонадо колеблется в пределах  $\rho = 3,69 - 3,93 \text{ г/см}^3$ . При этом абразивная способность, оцениваемая с помощью критерия  $K_a$  (Г/мг), может меняться в широких пределах (рис. 3.2, а).

Как видно из рисунка 3.2, наибольшие значения критерия  $K_a$  имеют место при  $\rho = 3,72-3,76 \text{ г/см}^3$ . Сама же зависимость  $K_a = f(\rho)$  имеет достаточно сложный характер. Метод требует значительной трудоемкости предварительной подготовки СПА и последующего определения  $\rho$ . Это позволяет сделать вывод о том, что определение абразивной способности

алмаза в производственных условиях с помощью такого косвенного критерия, как его плотность, представляет определенные трудности.

В работе [45] для определения абразивной способности алмаза выбран другой косвенный критерий – микротвердость СПА, величина которой измерялась с помощью трехгранного индентора Берковича. Обработка этих данных позволила представить приведенные результаты исследований по влиянию микротвердости СПА баллас (АСБ) на его абразивную способность (удельную производительность) в виде графика (рис. 3.2, б).

Эти данные свидетельствуют о том, что между микротвердостью и удельной производительностью существует тесная связь. Но надо иметь в виду, что в обоих случаях авторы не учитывали тот факт, что СПА имеют в своем составе металлофазу. Это может внести значительную погрешность в результаты определения указанных критериев. Опытные образцы СПА, отобранные с использованием приведенных методик, использовались в дальнейшем для сравнения при разработке экспресс-метода оценки абразивной способности путем шлифования.

### *3.2.2 Разработка способа предварительного контроля качества синтетических поликристаллических алмазов*

Если не проводить входной контроль качества СПА, то резко возрастает вероятность отбраковки уже полностью изготовленного карандаша, что экономически нецелесообразно. Последнее обстоятельство связано с тем, что не только ПСТМ разных марок имеют разную степень износостойкости [55], но они могут иметь значительный разброс физико-механических свойств даже в пределах одной марки [20], [36], [45], [122]. Особенно это касается СПА, и поэтому важно иметь эффективный метод контроля их качества еще до изготовления карандаша.

Как было показано выше, существующие критерии оценки абразивной способности алмазного карандаша имеют значительную трудоемкость. Что касается способов, основанных на определении плотности или микротвердости СПА, то они во многих случаях не могут дать стабильных результатов. В первом случае это связано с наличием в СПА металлофазы, а во втором – с чрезвычайной сложностью измерения

микротвердости алмаза алмазным индентором. Кроме этого, он слишком дорогой по причине использования инденторов из природного алмаза, срок службы которых при измерении микротвердости СПА (микротвердость которого примерно равна микротвердости природного алмаза), невелик.

Выполненные исследования и опыт применения алмазных правящих карандашей позволили предложить экспресс-способ оценки абразивной способности СПА (*патент № 75089, Украина*). Суть данных предложений иллюстрируется рисунком 3.3.

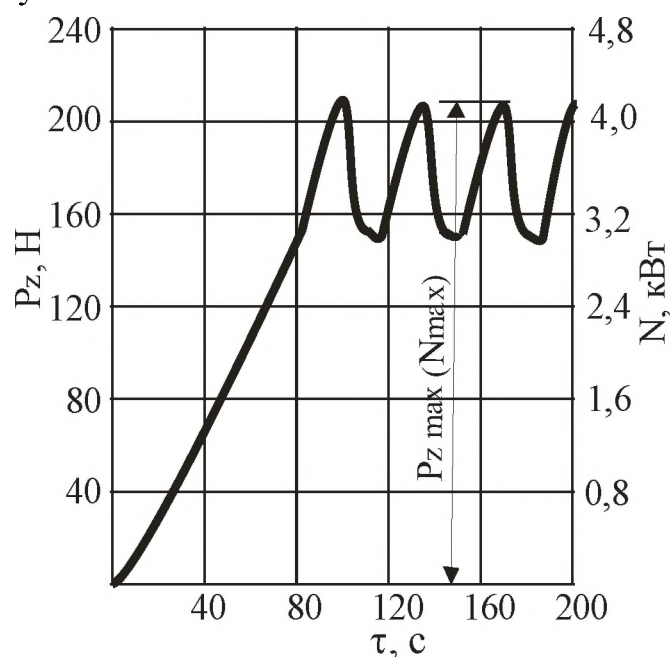


Рисунок 3.3 – Зависимости  $P_z=f(\tau)$  та  $N=f(\tau)$  при шлифовании СПА

Особенность экспресс-метода заключается в том, что абразивную способность СПА определяют не путем правки абразивного круга, а наоборот, путем шлифования самого СПА алмазным чашечным кругом на органической связке. В качестве косвенного критерия оценки при этом используют удельные значение одного из выходных показателей процесса шлифования: мощности шлифования, тангенциальной или нормальной составляющих силы резания. В последнем случае удобно оперировать понятием давления в контакте, значение которого прямо пропорционально нормальной составляющей силы резания. Из перечисленных выше показателей обработки в качестве косвенного критерия оценки абразивной



способности была выбрана удельная мощность  $N_{уд}$ , величина которой рассчитывается по формуле

$$N_{уд} = \frac{N_{max}}{S_{СПА}}, \quad (3.2)$$

где  $N_{уд}$  – удельное значение мощности шлифования, кВт/см<sup>2</sup>;  $N_{max}$  – максимальное значение эффективной мощности шлифования, кВт;  $S_{СПА}$  – площадь контакта РПК с СПА, см<sup>2</sup>.

Естественно, что для упрощения испытаний следует использовать образцы СПА, форма которых позволяет выдерживать в процессе шлифования условие:  $S_{СПА} = \text{const}$ .

Теоретической основой для разработки способа послужила установленная ранее [22], [24], [114] закономерность процесса шлифования СПА, которая заключается в периодичности самозатачивания алмазного круга, а следовательно, и изменения значений исходных показателей обработки во времени  $\tau$ , что достаточно наглядно иллюстрируется осциллограммой, приведенной на рис. 3.3. В данном случае это характерная картина изменения во времени тангенциальной силы  $P_z$ , а следовательно, и мощности  $N$  шлифования СПА алмазным кругом на органической связке (масштабы этих параметров выбраны такими, чтобы их графики совпадали). Оптимальной характеристикой круга для реализации способа являются: 12А2 45° 150х20х3х32 АС4 125/100 100 % В2 – 01. Испытания проводились на заточном станке, оснащенном механизмом автоматической поперечной подачи и динамометром или ваттметром. Максимальное значение тангенциальной силы  $P_{z \max}$ , а следовательно, и мощности  $N_{max}$  соответствуют моменту самозатачивания круга, процесс которого во времени протекает периодически. В пределах реальных значений поперечной подачи ( $S_{поп} = 0,005 - 0,03$  мм/дв. х) максимальные значения сил и мощности остаются неизменными [114], то есть не зависят от величины  $S_{поп}$ .

Установлено, что при неизменных условиях обработки абсолютные значения тангенциальной силы  $P_z$  и мощности  $N$  шлифования СПА главным образом зависят от микротвердости (а следовательно, абразивной

способности) последних и площади их контакта с РПК. Следовательно, для оценки абразивной способности СПА нужно использовать не абсолютное значение параметра (в данном случае мощности), а отнесенное к площади контакта СПА с РПК. При этом принципиально важно оперировать максимальной величиной мощности, значение которой, как было отмечено выше, не зависит от величины  $S_{\text{поп}}$  (в определенном диапазоне значений последней).

Таким образом, особенностью такого подхода к оценке абразивной способности СПА является то, что в данном случае используется как бы интегральная микротвердость СПА, которая дает более стабильные значения выходного показателя обработки, а следовательно, и косвенного критерия (например,  $N_{\text{уд}}$ ).

Выбор удельной мощности шлифования в качестве косвенного критерия оценки абразивной способности СПА объясняется тем, что абсолютное значение мощности  $N$  может быть установлено непосредственно (с помощью ваттметров, что легко реализовать в условиях производства). Кроме этого, оно может быть рассчитано на основе измеренного значения тангенциальной составляющей силы резания по известной зависимости:

$$N_{\text{max}} = \frac{P_{z \text{ max}} \cdot V_k}{1020}, \quad (3.3)$$

где  $V_k$  – скорость круга, м/с.

Для проверки способа в лабораторных условиях осуществляли шлифование пяти образцов СПА марки АСБ цилиндрической формы ( $\sim \varnothing 4,5$ ), микротвердость которых была заранее известна, до появления регулярных во времени пульсаций тангенциальной силы (для ее измерения использовали специальный тензометрический динамометр типа УДМ) и фиксировали максимальное эффективное значение тангенциальной составляющей силы резания  $P_{z \text{ max}}$ . Условия шлифования: круг 12А2 45° 150x20x3x32 АС4 125/100 100 % В2 – 01;  $V_k=20,4$  м/с;  $S_{\text{пр.}}=1$  м/мин;  $S_{\text{поп}}=0,01$  мм/дв. х, ТЖ – 3 % содовый раствор в воде. Данные, приведенные на рис. 3.3, соответствуют результатам эксперимента № 2 (см. таблицу 3.1).

В нашем случае на основе использования формулы (3.3) установлено, что  $N_{\max} = \frac{827,6 \cdot 20,4}{1020} = 4,2$  кВт. Здесь  $P_{\max} = 827,6$  Н. По формуле (3.2) имеем, что  $N_{\text{уд}} = N_{\max}/S_{\text{СПА}} = 4,2/0,16 \approx 26$  кВт/см<sup>2</sup>.

Таблица 3.1 – Зависимости  $N_{\text{уд}}$  и  $Q$  от  $H_{\text{СПА}}$

№ п/п	1	2	3	4	5
$H_{\text{СПА}}$ , ГПа	110	105	100	95	80
$N_{\text{уд}}$ , кВт/см <sup>2</sup>	30,0	26,0	23,0	22,0	15,0
$Q$ , см <sup>3</sup> /мГ	140	60	50	40	20

Результаты экспериментов, приведенные в таблице 3.1, свидетельствуют о существенной связи удельной мощности и микротвердости СПА ( $H_{\text{СПА}}$ ), а значит, такой показатель, как  $N_{\text{уд}}$ , может быть использован в качестве косвенного критерия для оценки абразивной способности СПА. Для алмазных правящих карандашей его значение, например, должно составлять  $N_{\text{уд}} \geq 20$  кВт/см<sup>2</sup>. При этом удельная производительность карандашей будет отвечать требованиям ГОСТ 607 – 80.

### 3.2.3 3D-моделирование напряженно-деформированного состояния системы «СПА – металлофаза – металлическое покрытие» при изготовлении алмазного карандаша

Компьютерное 3D-моделирование позволяет существенно сократить объем экспериментальных исследований для определения рациональных конструктивных параметров алмазно-абразивных и лезвийных инструментов, оптимальных условий их изготовления и использования. Реализация предложенной последовательности экспериментальным путем является чрезвычайно трудоемким и дорогостоящим процессом [23].

Целью исследования было установление влияния основных факторов на НДС системы «СПА – металлофаза – металлическое покрытие» при закреплении (пайке) СПА в державке в условиях высоких температур и разработка на этой основе практических рекомендаций по технологии изготовления карандаша.

Известно, что основным методом закрепления алмаза в корпусе карандаша является пайка с использованием различных, зачастую достаточно высокотемпературных припоев. Если в СПА есть металлические включения (металлофаза), коэффициент линейного расширения которых во многом превышает аналогичный показатель алмаза, то в условиях высокотемпературного воздействия в последнем возникают напряжения, величины которых могут превышать предел прочности алмаза. Как следствие – вероятно разрушение (растрескивание) СПА. Алмаз разрывается как бы изнутри [57], [141]. Чем выше коэффициент термического расширения металлофазы, тем больше должно быть напряжение в СПА и тем больше вероятность его разрушения в процессе изготовления или эксплуатации карандаша. Это может привести как к снижению общего срока его службы, так и к браку при обработке (правке). Следует иметь в виду, что в условиях высоких температур важную роль играют физико-механические свойства других факторов, входящих в указанную выше систему.

Известно, что одним из способов защиты алмаза от разрушения является нанесение на их поверхность рельефных толстослойных металлических покрытий [28], [114]. Их наличие на зерне способствует продлению ресурса алмаза благодаря лучшему его удержанию в связке (припое), предотвращению образования в нем макротрещин, «залечиванию» уже имеющихся микротрещин, защите от окисления СПА [12], [26] и т. д.

Еще одним важным свойством металлического покрытия является способность защитить алмаз (в случае нахождения внутри него металлофазы) от разрушения при воздействии на него высоких температур [114]. Нами было высказано предположение, что аналогичный эффект от покрытия будет наблюдаться и применительно к СПА, причем достаточно больших размеров. На основе данных предыдущих исследований толщина покрытия принималась равной 0,1 мм. Значения температуры принималось в соответствии с температурой плавления используемых припоев с тем условием, чтобы она не превышала температуру плавления металлического покрытия (никель, хром). Например, припой на основе серебра марки ПСР 40 ( $T_{пл}=610\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ГОСТ 19738 – 74, припой медно-

цинковый марки ПМЦ – 54 ( $T_{пл}=880\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ГОСТ 23137 – 78 и т.д. Отметим, что в отношении процесса пайки модель нагружали только температурным фактором, поскольку силовой фактор в данном случае практически отсутствует. На рис. 3.4 представлена визуализация результатов моделирования НДС системы «СПА – металлофаза – металлическое покрытие» в зависимости от модуля упругости ( $\mu$ ) покрытия. Установлено, что с повышением значения  $\mu$  напряжения в системе растут. Это является подтверждением того, что покрытие на алмазе может играть защитную функцию в условиях высокотемпературного процесса пайки СПА в державке алмазного карандаша.

Роль покрытия на СПА многоцелевая [114]. С одной стороны, оно способствует увеличению силы удержания СПА в матрице как за счет лучшего сцепления алмаза с покрытием по сравнению с матрицей, так и за счет увеличения общей площади поверхности покрытого СПА [114].

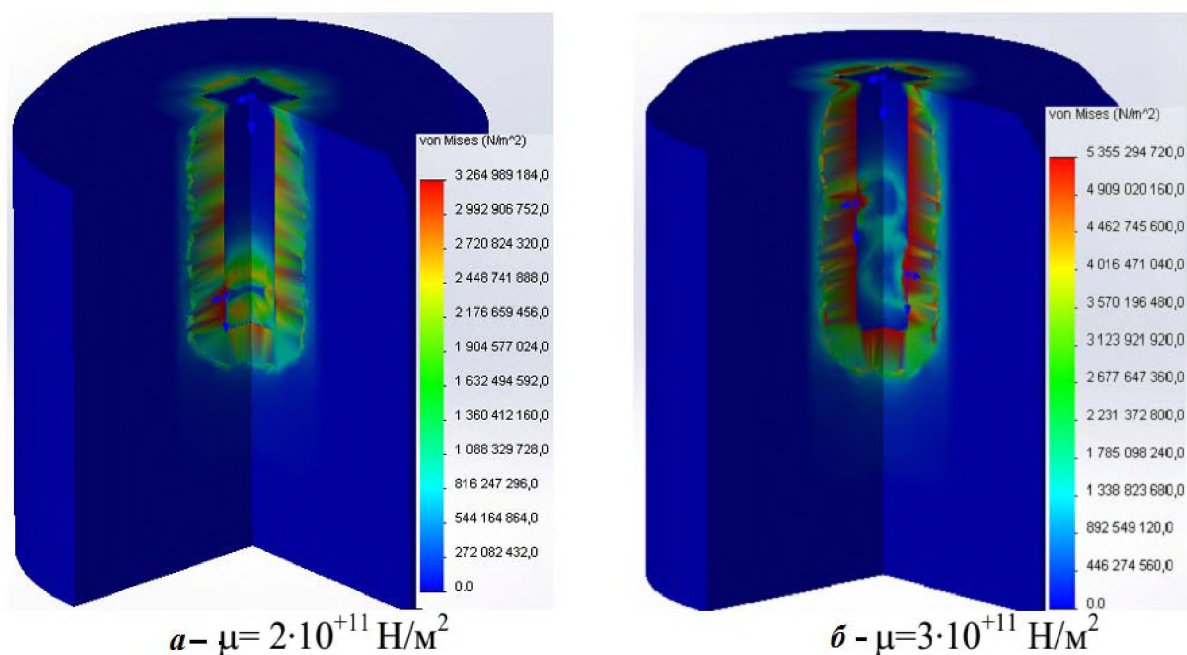


Рисунок 3.4 – Влияние модуля упругости покрытия на НДС системы «СПА – металлофаза – металлическое покрытие»

Во-вторых, в условиях воздействия на алмаз высоких значений сил и температур (например, при изготовлении алмазоносного слоя круга) оно, как панцирь, способствует предотвращению возможного растрескивания и разрушения алмаза [39], [114].

Это, несомненно, положительным образом скажется на проценте брака при изготовлении правящих карандашей из СПА, а также и на их работоспособности. Эти данные подтверждают тот факт, что наибольшие напряжения при нагреве сконцентрированы в области металлофазы, и именно она играет ключевую роль в разрушении алмазов [23], [57], [141]. При расположении включений металлофазы поблизости друг от друга наблюдается усиление полей напряжений в результате их наложения, а их распространение достигает 40 % от объема зерна [141]. Это, как правило, приводит к разрушению значительного объема алмазного зерна.

Для установления влияния различных факторов на НДС системы при пайке алмаза в корпус карандаша было использовано математическое планирование эксперимента. В частности, был реализован план второго порядка типа В4 [124]. В качестве факторов были приняты: процентное содержание металлофазы (М,%), модуль упругости покрытия на алмазе ( $\mu$ , Н/м<sup>2</sup>), коэффициент термического расширения металлофазы (КТР, 1/К), температура пайки (Т, °С), значение которых представлены в таблицах 3.2 и 3.3 [115]. В качестве параметра оптимизации выбраны эквивалентные напряжения в системе ( $\sigma_{\text{екв}}$ ).

Таблица 3.2 – Уровни варьирования факторов плана В4\*

Уровни варьирования факторов	Факторы							
	Содержание металлофазы М		Модуль упругости $\mu$ покрытия при 900°С		КТР металлофазы (при 900°С)		Температура пайки Т	
	Натуральное значение, %	Кодированное значение, X1	Натуральное значение, Н/м <sup>2</sup>	Кодированное значение, X2	Натуральное значение, 1/К	Кодированное значение, X3	Натуральное значение, °С	Кодированное значение, X4
ВР	9,9	+1	3.0E+011	+1	45.0E-06	+1	1400	+1
ОР	5	0	2.0E+011	0	25.0E-06	0	1000	0
НР	0,1	-1	1.0E+011	-1	5.0E-06	-1	600	-1

\*ВР,ОР,НР – верхний, основной и нижний уровни варьирования факторов

Таблица 3.3 – Матрица планирования эксперимента

№ з/п	Факторы				$(\sigma_{\text{ЕКВ}})$ , ГПа
	М, %	$\mu$ , $H/m^2$	КТР, 1/К	$T$ , °С	
1	9,9	3,0E+11	45,0E-06	1400	15,50
2	0,1	3,0E+11	45,0E-06	1400	1,65
3	9,9	1,0E+11	45,0E-06	1400	8,89
4	0,1	1,0E+11	45,0E-06	1400	1,63
5	9,9	3,0E+11	5,0E-06	1400	1,69
6	0,1	3,0E+11	5,0E-06	1400	1,62
7	9,9	1,0E+11	5,0E-06	1400	1,78
8	0,1	1,0E+11	5,0E-06	1400	1,62
9	9,9	3,0E+11	45,0E-06	600	10,67
10	0,1	3,0E+11	45,0E-06	600	0,69
11	9,9	1,0E+11	45,0E-06	600	3,72
12	0,1	1,0E+11	45,0E-06	600	0,68
13	9,9	3,0E+11	5,0E-06	600	0,70
14	0,1	3,0E+11	5,0E-06	600	0,67
15	9,9	1,0E+11	5,0E-06	600	0,73
16	0,1	1,0E+11	5,0E-06	600	0,67
17	9,9	2,0E+11	25,0E-06	1000	5,36
18	0,1	2,0E+11	25,0E-06	1000	1,15
19	5	3,0E+11	25,0E-06	1000	8,53
20	5	1,0E+11	25,0E-06	1000	2,83
21	5	2,0E+11	45,0E-06	1000	12,52
22	5	2,0E+11	5,0E-06	1000	1,14
23	5	2,0E+11	25,0E-06	1400	7,81
24	5	2,0E+11	25,0E-06	600	3,26

На рис. 3.5 представлена визуализация результатов моделирования по установлению влияния принятых факторов на НДС зоны пайки алмазного карандаша.

Очевидно, что в случае нахождения в составе СПА минимального количества металлофазы (или при ее практическом отсутствии) НДС

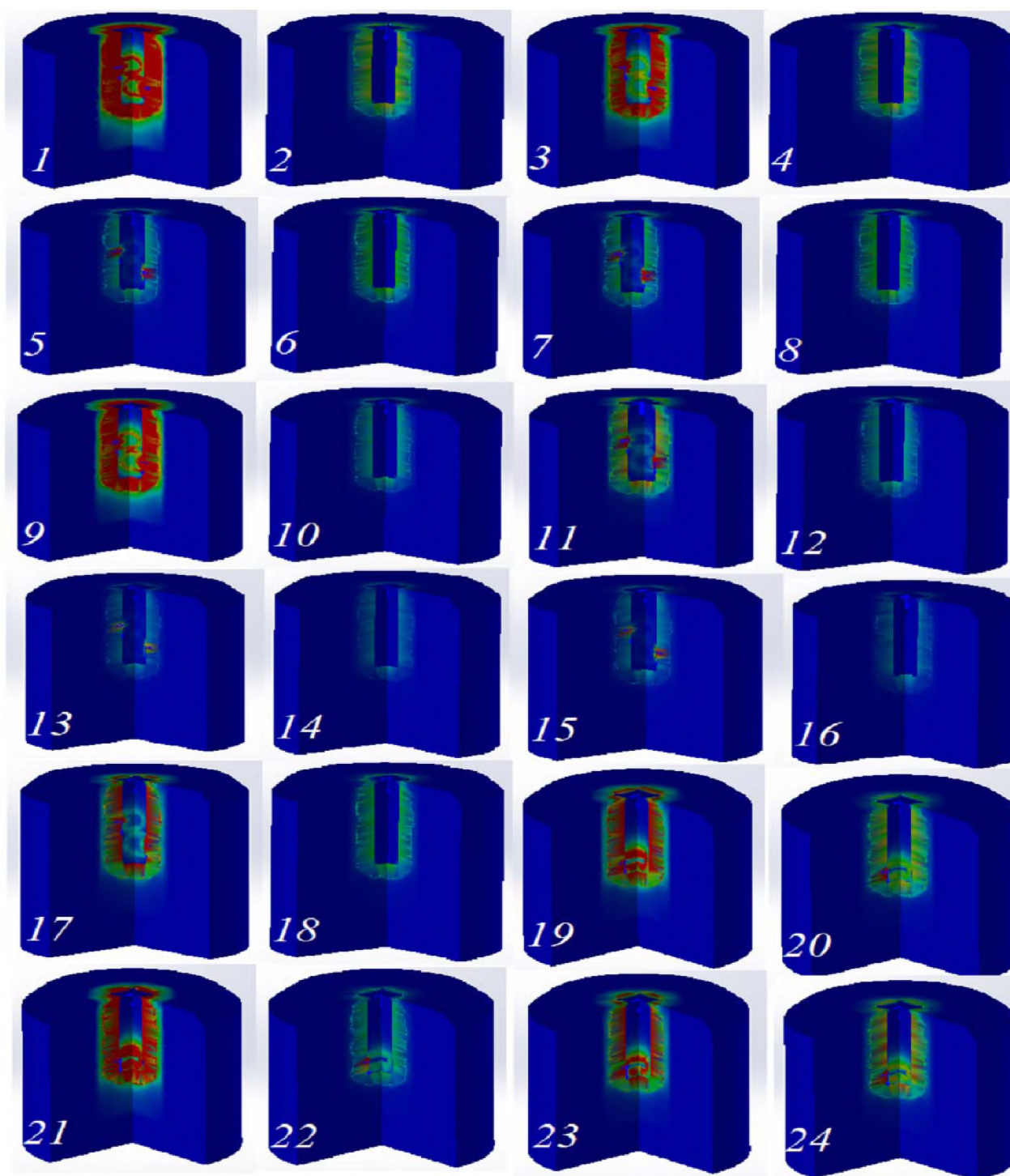


Рисунок 3.5 – Визуализация результатов моделирования НДС системы  
«СПА – металлофаза – металлическое покрытие» [115]

системы должно быть минимальным (из-за отсутствия концентратора возникновения значительных напряжений). Это подтверждается



результатами моделирования (опыты 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 и 18). Учитывая то, что предел прочности алмаза на растяжение составляет примерно 2,0 ГПа, можно сделать вывод о том, что СПА, в составе которых практически нет металлофазы, даже при температуре пайки 1500 °С не должны подвергаться макро- или микроразрушению. То есть такие алмазы можно использовать даже при применении высокотемпературных и, как правило, износостойких припоев. Это очень важно с точки зрения технологии изготовления и эксплуатации правящих карандашей.

Таким образом, материалы, представленные на рис. 3.4 и 3.5, подтверждают тот факт, что максимальные напряжения концентрируются на границах включений металлофазы.

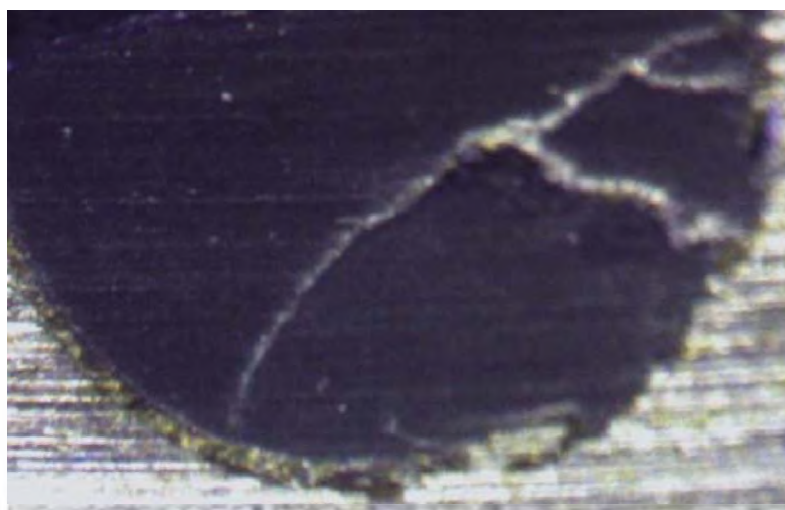
В случае превышения ими пределов прочности алмаза может инициироваться процесс развития внутренних трещин в СПА, которые, в свою очередь, могут привести к макроразрушению поликристалла в целом (см. рис. 3.6).

В последнем случае использовались СПА с различным содержанием металлофазы. Как видно из рис. 3.6, при значительном количестве металлофазы ( $\approx 10\%$ ) в СПА может образовываться система магистральных трещин. По мере ее снижения количество трещин уменьшается, а при приближении содержания металлофазы к некоторому минимуму – они практически отсутствуют. Обработка результатов планируемого многофакторного эксперимента позволила установить, что при использовании высоких температур пайки (1000 – 1400 °С) и наличии на СПА металлического покрытия этот минимум находится в пределах до 4 %.

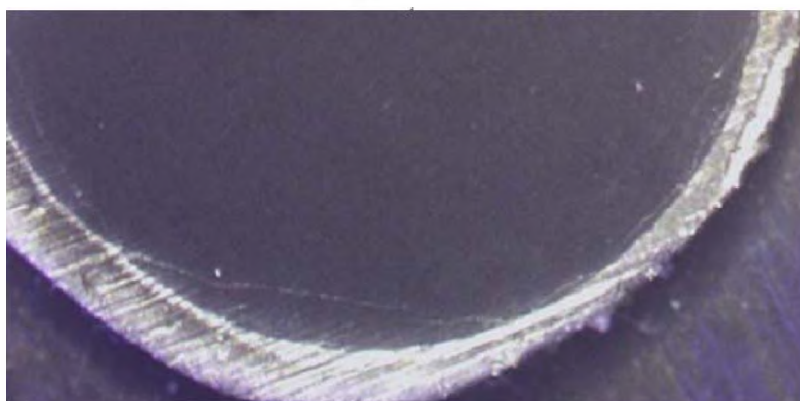
Этим требованиям удовлетворяют СПА марки СВ (метод спекания алмазных микропорошков при высоких значениях давления и температуры) [79] и CVD алмазы [63], [102], [113]. Последние могут практически не иметь в своем составе металлофазы, а по физико-механическим свойствам в наибольшей степени приближаются к природным алмазам.

Кроме указанного выше, важным преимуществом СПА является отсутствие необходимости ориентации алмаза при закреплении в державке

инструмента, поскольку благодаря поликристаллическому строению СПА имеют практически одинаковую микротвердость в любом направлении.



***а***



***б***



***в***

Рисунок 3.6 – Влияние содержания металлофазы на состояние СПА при высокотемпературной пайке ( $T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в державке карандаша:

а –  $M=9,9\text{ }\%$ ; б –  $M=5\text{ }\%$ ; в –  $M=0,1\text{ }\%$

Такие алмазы в ближайшее время позволят решить актуальную проблему замены природных алмазов во многих отраслях народного хозяйства.

#### *3.2.4. Разработка способа изготовления правящего карандаша из синтетических поликристаллических алмазов*

Суть изменения технологии изготовления алмазных карандашей состоит в использовании в качестве СПА CVD-алмаза [63], [102], [113], который по своим физико-механическим свойствам максимально приближается к природному алмазу, а также в предварительном нанесении на поверхность СПА толстослойного рельефного металлического покрытия [75], [114].

С учетом выполненных исследований предложен способ изготовления алмазного правящего карандаша (*патент № 74681, Украина*), согласно которому СПА предварительно соединяют цепочкой в блок, после чего наносят на этот блок рельефное толстослойное металлическое покрытие. И уже после этого указанный блок поликристаллов закрепляют в державке карандаша одним из известных способов, например, запайкой. Конструкция карандаша схематично представлена на рис. 3.7.

Такой подход позволяет еще на предварительном этапе обеспечить точное и плотное прилегание поликристаллов друг к другу, что важно для осуществления процесса качественной правки, а также более полное использования ресурса алмаза. Предыдущие исследования НДС системы «СПА – металлофаза – металлическое покрытие» показали, что толщина покрытия должна быть не меньше чем 0,1 мм.

Для подтверждения предложенного технического решения были проведены экспериментальные исследования. Согласно ГОСТ 607 – 80, абразивная способность алмазных карандашей оценивается с помощью удельной производительности ( $\text{см}^3/\text{мГ}$ ).

Этим же стандартом регламентированы условия проведения испытания алмазных карандашей (подраздел 3.2.1).

Испытуемый абразивный круг (ГОСТ 2424-83) имел такую характеристику: ПП 250x40x76 24А 25 СТ 1 6 К5 (вариант 1). Для

сравнения испытания были проведены на кругах ПП 250х40х76 24А 25 ОМ 1 6 К5 (вариант 2) и ПП 250х40х76 24А 8 ОМ 1 6 К5 (вариант 3,  $S_{non} = 0,01\text{мм/ход}$ ).

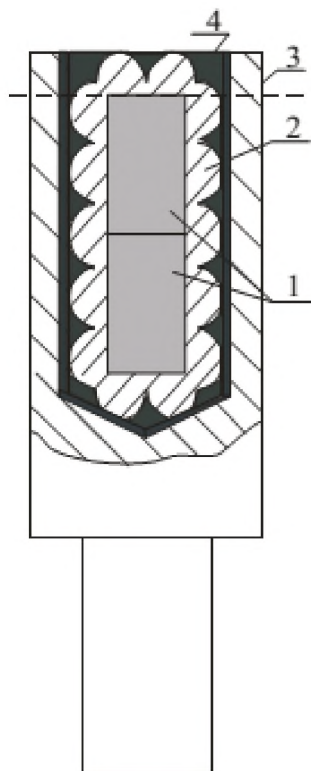


Рисунок 3.7 – Конструкция алмазного карандаша:  
1 – СПА; 2 – металлическое толстослойное рельефное покрытие; 3 – державка (корпус); 4 – припой

Использовали карандаш из CVD алмаза (800053 А-01). Алмаз отбирался в соответствии с описанным выше экспресс-методом (см. подраздел 3.2.2). Для сравнения использовали карандаш 3908-0051 (исполнение А, тип 01) из природного алмаза производства ОАО «Терекалмаз» (весовая группа алмазов 0,03 – 0,05 карат, общая масса алмазов 0,5 карат). Результаты испытаний представлены в таблице 3.4 [20].

Полученные данные свидетельствуют о том, что предложенные подходы к изготовлению алмазных карандашей дают возможность реализовать на практике значение абразивной способности СПА на уровне природного алмаза.

Таблица 3.4 – Результаты испытаний алмазных карандашей

№ варианта	Шифр алмазного карандаша		Расхождение, %
	800053 А-01	3908-0051	
	Удельная производительность Q, см <sup>3</sup> /мГ		
1	49	51	4,0
2	1984	1990	0,3
3	5000	5000	0

### 3.3. Обеспечение высокой работоспособности алмазных карандашей из СПА на этапе их эксплуатации

#### 3.3.1 Разработка способа алмазной правки торцевых абразивных кругов на шлифовальных станках с вертикальным шпинделем

Как было отмечено выше, температурный фактор имеет существенное значение в случае правки абразивных кругов алмазными инструментами [54], [53]. Он негативно сказывается на общем сроке службы алмазных карандашей, поскольку температура является одним из факторов, который существенно влияет на абразивную стойкость алмаза. Известно, что термомеханические напряжения, возникающие в алмазе в процессе правки РПК, определяются как температурой, так и силой резания [54]. При этом изменение касательной составляющей ( $P_z$ ) силы правки приводит к прямо пропорциональному изменению количества теплоты, выделяемого в зоне правки, а следовательно, и контактной температуры. Эксплуатация правящего инструмента недопустима при  $P_z \geq 10$  Н, потому что контактные температуры в этом случае достигают критических значений, что приводит к резкому уменьшению механической прочности и теплопроводности алмаза [35], [54]. Сила резания при правке зависит от большого количества факторов, основными из которых являются глубина правки и величина продольной подачи, а также условия проникновения ТЖ в зону правки.

В этом случае очень важно обеспечивать в зоне правки температуру ниже, чем ее критическое для алмаза значение, то есть  $T \leq 700$  °С. Это не позволяет проявиться интенсивному протеканию известных эффектов окисления и графитизации алмаза [17]. Поэтому современные

производители создают конструкции правящего алмазного инструмента с прямой подачей ТЖ через встроенные протоки. По данным немецких фирм «Dr. Kaiser» и «Audi», это гарантирует оптимальную защиту алмазов от перегрева [156], [161].

В обычных условиях согласно ГОСТ 607 – 80 рекомендуется использовать обильную подачу в зону правки ТЖ (не менее 20 л/мин.). При использовании обычных процессов шлифования это требует применения специальных устройств для защиты от разбрызгивания.

Наиболее эффективно задача охлаждения алмаза решается применительно к правке абразивных торцевых кругов на станках с вертикальным расположением шпинделя (см. раздел 1), когда правящий инструмент находится в сплошном слое ТЖ (*патент 76444, Украина*) благодаря использованию специальных ванн. Суть способа правки поясняется рис. 4.7, а. Результаты испытаний алмазных карандашей из СПА и природных (ПА) алмазов по ГОСТ 607 – 80 приведены на рис. 3.8, б.

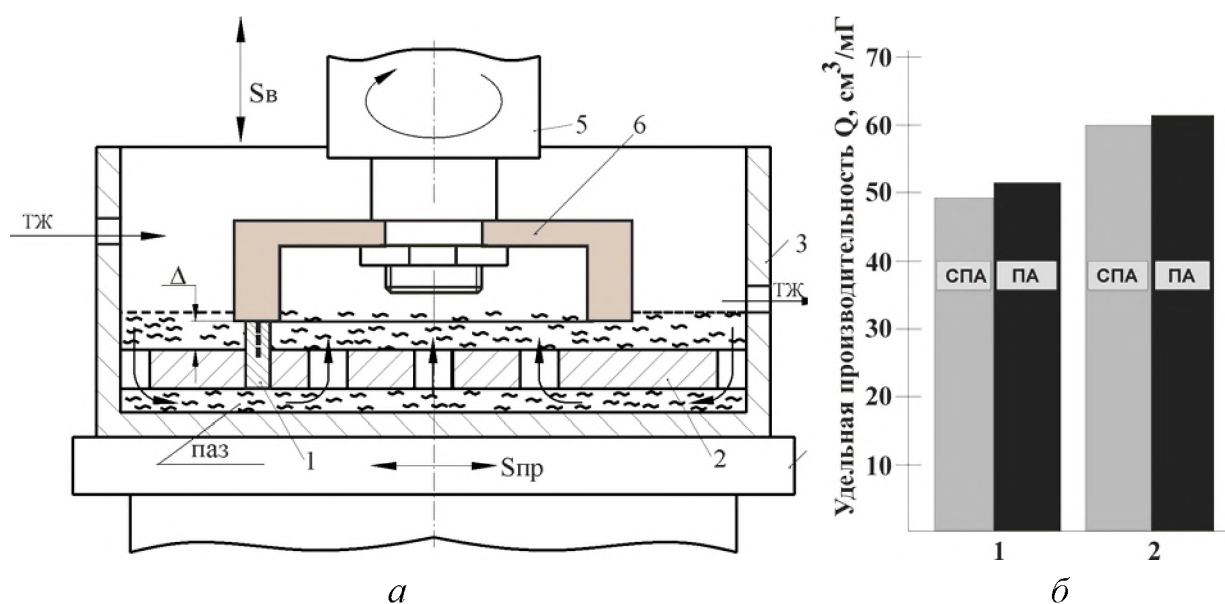


Рисунок 3.8 – Схема реализации способа правки (а) и результаты испытаний алмазных карандашей по ГОСТ 607 – 80 (б):

1 – правка с охлаждением путем полива ТЖ;

2 – правка в сплошном слое ТЖ

Согласно рис. 3.8, алмазный правящий карандаш 1 устанавливают в специальной плите 2, находящейся в ванне 3, которая, в свою очередь, расположена на столе 4 плоскошлифовального станка. При этом рабочая поверхность карандаша 1 имеет вылет над плитой 2 не менее  $\Delta=0,1$  мм. Торцевой абразивный круг 6 установлен на вертикальном шпинделе 5 станка. Стол 4 станка выполняет поступательное движение с продольной подачей  $S_{пр}$ , а шпиндельный узел имеет возможность выполнять вертикальную подачу  $S_v$ . Для подачи и слива ТЖ в ванне выполнены два отверстия, причем отверстие для подачи ТЖ находится несколько выше отверстия для слива.

Последнее располагают таким образом, чтобы уровень слоя ТЖ превышал уровень РПК на величину не менее 5 мм.

Известно [33], [52], [147], что при вращении круга создается воздушный поток, препятствующий попаданию ТЖ в зону правки при подаче ее методом полива. Но в данном случае ТЖ подается в ванну и через отверстия и пазы в плите 2 надежно подается во внутреннюю полость круга 6, а затем под действием центробежных сил прокачивается через зазор  $\Delta$ . Таким образом, в процессе правки круга происходит гарантированное интенсивное охлаждение алмаза в карандаше 1 даже в экстренном случае, когда, например, по какой-либо причине прекратится подача ТЖ.

Экспериментальные исследования позволили установить, что использование предложенного способа правки обеспечивает увеличение удельной производительности карандашей (как СПА, так и натуральных алмазов) на 10 – 20 % (в зависимости от марки алмаза, характеристики круга и т.д., рис. 3.8, б).

## Выводы

1. Задачу снижения теплонапряженности процесса плоского торцевого шлифования за счет повышения эффективности процесса правки РПК алмазными карандашами из СПА необходимо решать комплексно, то есть как на этапе изготовления правящих инструментов, так и на этапе их эксплуатации.

2. Предложенный экспресс-метод оценки абразивной способности СПА путем алмазного шлифования (*патент № 75089, Украина*) позволяет использовать на этапе изготовления карандашей только качественные СПА, абразивная способность которых находится на уровне естественных алмазов.

3. На базе компьютерного 3D-моделирования НДС системы «СПА – металлофаза – металлическое покрытие» в условиях высокотемпературного закрепления СПА в державке установлена перспективность применения СПА с минимальным содержанием металлической фазы (не более 4 %). К таким алмазам в первую очередь следует отнести такие, которые изготавливаются по CVD технологии.

4. Применение CVD-алмазов, абразивная способность которых приближается к природному алмазу, содержащих минимальное количество металлофазы, позволяет использовать высокотемпературные износостойкие припои (связки), что на практике способствует повышению эффективности закрепления СПА в державке.

5. Нанесение на СПА рельефных толстослойных металлических покрытий способствует повышению их ресурса за счет защиты от растрескивания и лучшего удержания в державке. В связи с этим предложен способ изготовления алмазного правящего карандаша (*патент № 74681, Украина*). Новым является то, что впервые используются поликристаллы CVD-алмаза в виде блока с нанесенным на него рельефным толстослойным металлическим покрытием. Это во многом способствует уменьшению процента брака алмазных карандашей из СПА.

6. Предложен способ алмазной правки торцевых абразивных кругов на шлифовальных станках с вертикальным шпинделем в сплошном слое ТЖ (*патент 76444, Украина*), который обеспечивает увеличение удельной производительности карандашей (как из СПА, так и природных алмазов) на 10 – 20 % (в зависимости от марки алмаза, характеристики круга и т.д.). Это позволяет эффективно управлять параметрами зоны контакта РПК с деталью, а следовательно, способствует повышению эффективности плоского торцевого шлифования на станках с вертикальным расположением шпинделя.



#### **4. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЛОСКОГО ТОРЦЕВОГО ШЛИФОВАНИЯ**

*В ходе выполнения теоретических расчетов, компьютерного геометрического моделирования, 3D-моделирования НДС систем, а также лабораторных исследований было предложено и доведено до уровня изобретений ряд технических решений, направленных на совершенствование условий снижения температуры в зоне обработки, которые могут быть частично или полностью объединены в предлагаемой конструкции плоскошлифовального станка с вертикальным шпинделем. Это позволило реализовать комплексный подход к достижению цели исследований.*

##### **4.1. Исследование и практическая реализация возможности управления процессом самозатачивания шлифовальных кругов за счет создания в зоне контакта произвольных механических колебаний**

Как было отмечено в первом разделе, ввод в зону шлифования механических колебаний должен способствовать существенному повышению эффективности процесса. В первую очередь это касается обработки высокотвердых материалов и особенно ПСТМ. В связи с этим была впервые предпринята попытка оценки влияния механических колебаний при шлифовании на 3D НДС в системе «алмазное зерно – связка – ОМ». Эти исследования выполнены по ранее предложенной проф. Федоровичем В.А. методике [19], [142]. Они показали, что при введении механических колебаний в зону обработки ПСТМ максимальные напряжения, возникающие в рассматриваемой системе, значительно превышают их значения по сравнению с обычным шлифованием (рис. 4.1) [19]. Это, безусловно, способствует улучшению условий самозатачивания алмазных зерен круга, а значит, положительно влияет на выходные показатели процесса обработки в целом.

Как известно, специальные устройства для создания механических колебаний в зоне шлифования представляют собой сложные и массивные

конструкции [22], [25], [64], [99], [141], что сдерживает их внедрение в производство.

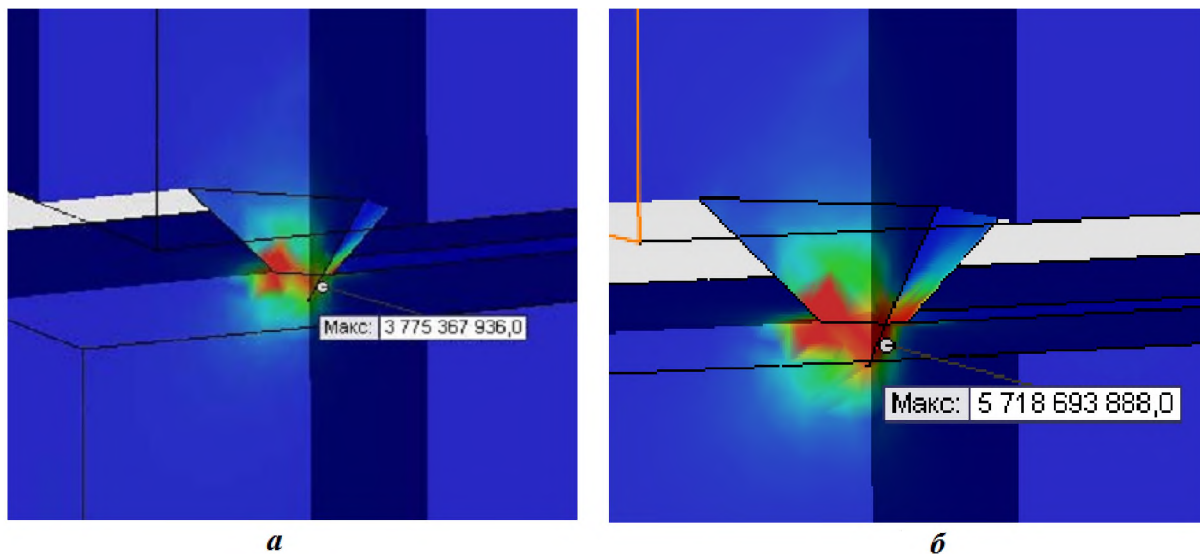


Рисунок 4.1 – Величина  $\sigma_{\text{экв}}$  в системе «алмазное зерно – связка – ОМ»:

$$a - f = 0 \text{ Гц}; b - f = 50 \text{ Гц}$$

Поэтому была сделана попытка упрощения процесса генерации механических колебаний в зоне резания, несмотря на возможное незначительное снижение производительности обработки по сравнению со сложными системами.

Предложено предоставить упругой муфте, предназначенной обычно для передачи крутящего момента от вала электродвигателя к шпинделю шлифовального станка, функцию создания произвольных механических колебаний в зоне шлифования. Для этого была предложена конструкция муфты (*патент № 109911, Украина*) с более широкими возможностями управления упругими свойствами (рис. 4.2) по сравнению с известными аналогами (например, [94], ГОСТ 50894 – 96 и другие). Ее особенностью является то, что рабочими элементами двух полумуфт служат цилиндрические пальцы, которые жестко закреплены на торцах каждой полумуфты и расположены с одинаковым шагом по окружности, ось которой совпадает с осью вращения полумуфты. Упругие элементы представляют собой сменные втулки необходимой жесткости, установленные на этих пальцах. Значение углового шага пальцев каждой полумуфты должно соответствовать неравенству:

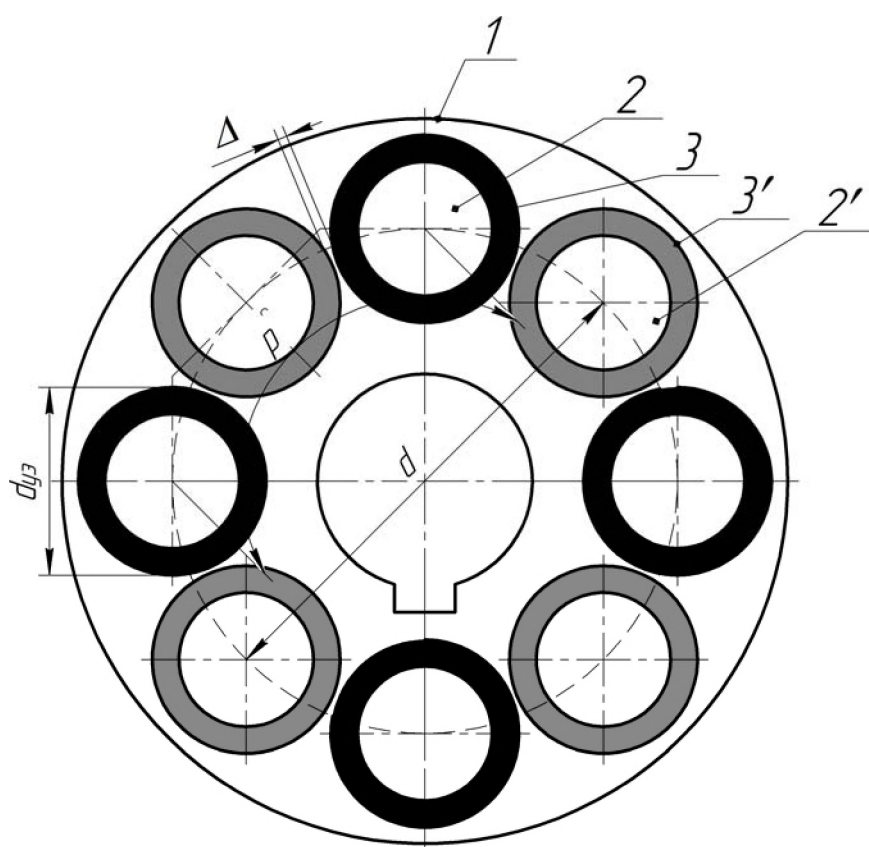
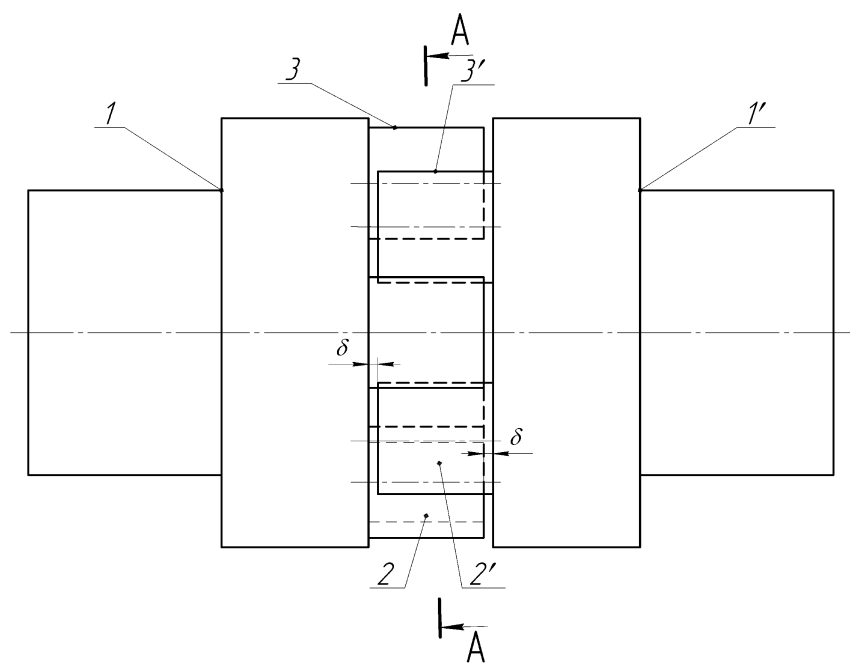


Рисунок 4.2 – Муфта упругая для создания произвольных механических колебаний

$$p \geq 2 \cdot \left[ d_{y\varphi} + \frac{1}{3} \cdot (d_{y\varphi} - d_{y\varphi} \cdot \sqrt{1 - \frac{d_{y\varphi}^2}{4 \cdot d^2}}) + \Delta \right], \quad (4.1)$$

где  $p$  – угловой шаг пальцев, мм;  $d_{y\varphi}$  – наружный диаметр пальца в сборе с упругим элементом, мм;  $d$  – диаметр круга, на котором расположены оси пальцев, мм;  $\Delta$  – зазор между пальцами соединенных полумуфт. Предложенная конструкция упругой муфты позволяет не только создавать, но и в определенных пределах изменять уровень произвольных вибраций в зоне шлифования. Это становится возможным благодаря наличию системы рабочих пальцев со сменными упругими элементами и управлению величинами зазоров между ними в собранной муфте.

Как видно из рис. 4.2, муфта состоит из полумуфт  $I$  и  $I'$ , цилиндрических пальцев  $2$  и  $2'$  и сменных упругих элементов  $3$  и  $3'$  размещенных на этих пальцах. Оси пальцев  $2$  и  $2'$  расположены с шагом  $p$  по окружности диаметром  $d$ . После установки на пальцы внешний диаметр упругих элементов составляет  $d_{y\varphi}$ . Зазор  $\Delta$  между пальцами в сборе с упругими элементами, которые принадлежат различным полумуфтам, выполняет несколько функций. Во-первых, он компенсирует возможное смещение осей валов и погрешности монтажа пальцев, а во-вторых, путем изменения его величины можно дополнительно влиять на уровень вибраций в системе. А это, вместе с изменением упругих свойств сменных элементов, существенно расширяет технологические возможности муфты. Экспериментально установлено, что минимальное значение зазора  $\Delta$  должно равняться 0,5 мм. Этот зазор измеряется между точками пересечения окружностей диаметрами  $d_{y\varphi}$ , принадлежащих пальцам с упругими элементами соединенных полумуфт, с окружностью диаметром  $d$ . В случае, когда зазор равен нулю, муфта имеет практически такие же показатели, как и обычная упругая муфта.

Если конструкция и размеры посадочных поверхностей концов вала электродвигателя и шпинделя одинаковы, то обе полумуфты, в целом составляющие муфту, могут быть абсолютно идентичными. Если эти условия не выдерживаются, то полумуфты в первую очередь будут отличаться посадочными поверхностями. Но цилиндрические пальцы со сменными упругими элементами, их количество и расположение должны

быть одинаковым. Значение диаметра пальца определяется, как правило, путем расчета на прочность, а величина диаметра  $d$  принимается по конструктивным соображениям. В собранном виде между торцами пальцев одной полумуфты и рабочим торцом корпуса другой должен быть гарантирован зазор  $\delta$ .

Для проверки эффективности предложенного технического решения были проведены экспериментальные исследования. Они проводились на базе модернизированного универсально-заточного станка мод. 3Д642Е. Модернизация заключалась в оснащении станка специальным устройством для электрохимической правки торцевого шлифовального круга и устройством для обработки по упругой схеме. Угловой шаг пальцев полумуфт с четырьмя цилиндрическими пальцами на каждой, рассчитанный по приведенной выше формуле, составлял:  $p = 72,4$  мм ( $d_{y3} = 35$  мм;  $d = 92,2$  мм;) в случае, когда  $\Delta = 1$  мм и  $p = 70,4$  мм ( $d_{y3} = 35$  мм;  $d = 90$  мм); в случае, когда  $\Delta = 0$  мм. В предложенной муфте использовали упругие элементы в виде трубок из резины различной твердости. Поскольку наибольшая эффективность от введения вибраций в зону шлифования проявляется при обработке хрупких материалов, то проводили черновое шлифование заготовок из СПА марки СКМ – Р.

Предложенную конструкцию муфты сравнивали с муфтой по ГОСТ 50894 – 96. Условия обработки: круг 12А2 150х20х3х32 АС6 125/100 М2-01 100 %  $V_k = 23$  м/с;  $S_{гр} = 0,5$  м/мин;  $S_{поп} = 0,01$  мм/дв. х;  $P_H = 20$  Н. Электролит – водный раствор нитрида натрия ( $\text{NaNO}_3$ ) – 3% и 1 – 2% кальцинированной соды ( $\text{Ca}_2\text{CO}_3$ ). Данные испытаний различных конструкций муфт приведены в таблице 4.1.

Как видно из данных таблицы, предложенная конструкция муфты обеспечивает повышенную производительность обработки за счет создания определенного уровня вибраций в зоне шлифования. При увеличении твердости резины и при наличии зазора между цилиндрическими пальцами с размещенными на них упругими элементами производительность растет.

Таким образом, предложенная конструкция муфты сочетает в себе несколько функций. Основными являются те, что она может передавать крутящий момент от вала электродвигателя к шпинделю шлифовального

станка при наличии отклонений от соосности осей валов и ошибок монтажа, а также дает возможность создавать произвольные вибрации в зоне шлифования с некоторым уровнем регулировки их интенсивности.

Таблица 4.1 – Сравнительные данные для конструкций муфт

Конструкция муфты	Твердость резины по Шору А (ГОСТ 263-75)	Зазор $\Delta$ , мм	Производительность обработки $Q$ , мм <sup>3</sup> /мин
Ближайший аналог (ГОСТ 50894 – 96)	60	-	4
Предложенная	60	0	4
	60	1	5
	90	1	7

#### **4.2. Разработка устройства для подачи технологической жидкости в зоны шлифования и правки на плоскошлифовальных станках с вертикальным шпинделем**

Как уже отмечалось, наиболее эффективным способом подачи ТЖ в зоны шлифования и правки при плоском торцевом шлифовании является ее подача во внутреннюю полость круга [21]. Когда шпиндель станка сплошной, а ТЖ надо подавать во внутреннюю полость круга, то, как было отмечено в разделе 1, возникает вопрос использования специальных устройств. Устройство в виде специального торцевого круга [114] имеет значительный недостаток, заключающийся в том, что для его реализации нужны или специальные круги с пазами на базовом торце, или модернизация стандартных кругов. И в том, и в другом случаях возникает необходимость сборки устройства каждый раз при замене изношенного круга. Кроме этого, при наличии пазов на торце опасность ослабления прочности круга и особенно при использовании кругов из обычных абразивов, а также кругов из сверхтвердых материалов с прессованным (не цельнометаллическим) корпусом является дополнительным ограничивающим фактором при назначении высокопроизводительных режимов обработки, а следовательно, снижает технологические возможности процесса шлифования. В связи с этим была предложена

более совершенная конструкция устройства (рис. 4.3, *патент № 82805, Украина*).

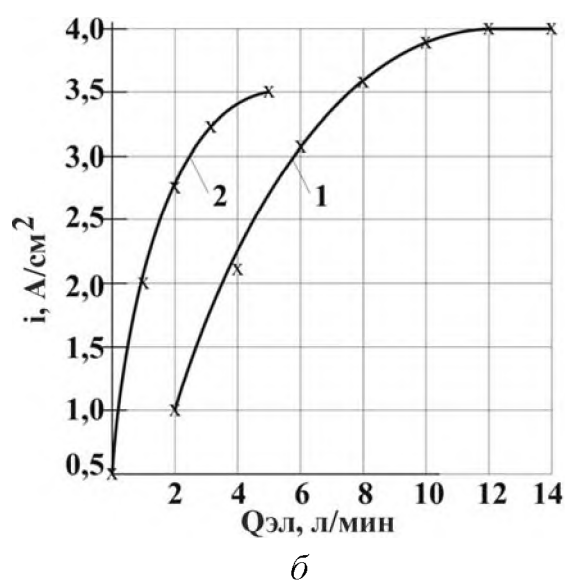
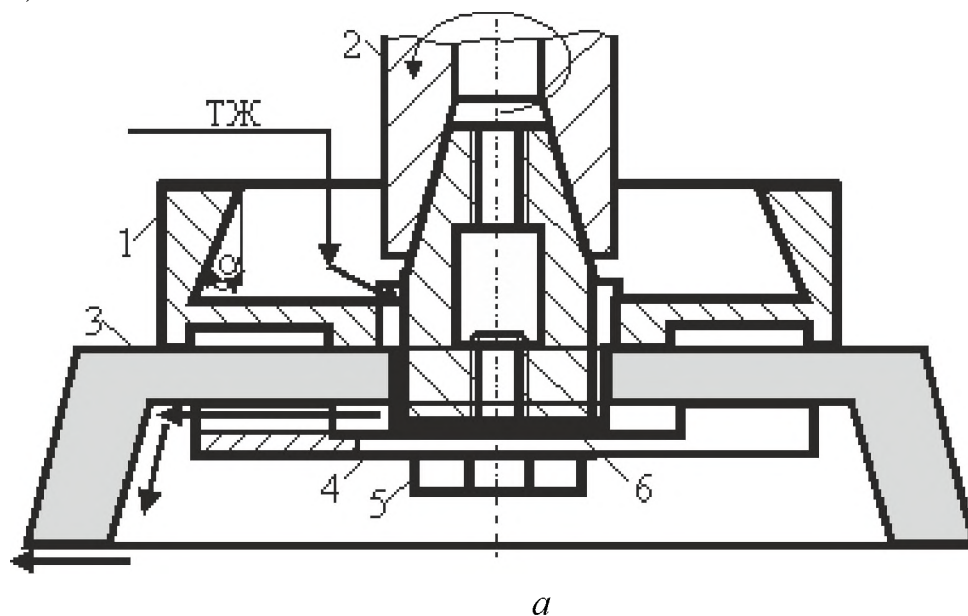


Рисунок 4.3 – Схема устройства для подачи ТЖ в зоны шлифования и правки РПК и зависимости  $i = f(Q_{эл})$ :

1 – подача электролита через полый шпиндель в пустую ванную;

2 – подача электролита через стакан в ванную с электролитом

Как видно из рис. 4.3, а сменная оправка 1, установленная с помощью конуса в шпинделе 2 плоскошлифовального станка, выполнена

как одно целое со стаканом, во внутреннюю полость которого подается ТЖ. Внутренняя поверхность стакана наклонена по отношению к оси вращения круга под острым углом  $\alpha$ , что способствует лучшему попаданию ТЖ во внутреннюю полость круга. При необходимости оправка 1 может дополнительно крепиться на шпинделе, например, с помощью струны (на рисунке не показана), для чего она имеет верхнее резьбовое отверстие. Нижняя внешняя торцевая поверхность стакана является главной установочной базой для шлифовального круга 3, который крепится к оправке 1 с помощью шайбы 4 и болта 5. Для этого в нижней части оправки предусмотрено резьбовое отверстие. На образующих цилиндрической поверхности, которая является для круга направляющей базой, выполнены не сквозными по глубине пазы. При этом визуально данная цилиндрическая поверхность напоминает шлицевый вал. В осевом направлении пазы выполнены сквозными, при этом, с одной стороны, они выходят в полость стакана, а с другой – во внутреннюю полость шлифовального круга 3. На торце шайбы 4, прилегающем к внутреннему торцу круга 3, в радиальном направлении выполнены не сквозные по глубине пазы. Это позволяет направлять ТЖ, поступающую из полости стакана через пазы на оправке 1, на внутреннюю поверхность круга 3. Эластичная прокладка 6 позволяет обеспечить попадание всего потока жидкости в пазы шайбы 4, а следовательно, на внутреннюю поверхность круга 3, откуда она под действием центробежных сил интенсивно прокачивается через зоны шлифования или правки, как показано на рисунке стрелками. Таким образом, сменная оправка одновременно выполняет несколько функций: во-первых, на ней устанавливается и закрепляется шлифовальный круг, во-вторых, с ее помощью круг механически связан со шпинделем. Кроме этого, благодаря стакану и системе пазов оправка выполняет функцию доставки ТЖ во внутреннюю полость круга (третья функция). Таким образом, предложенное устройство позволяет, во-первых, использовать стандартные шлифовальные круги, а следовательно, реализовывать высокопроизводительные режимы шлифования, во-вторых, уменьшить вспомогательное время на обработку за счет исключения операции сборки устройства при замене круга. По производительности возможности подачи ТЖ во внутреннюю полость



круга в данном случае несколько ниже, чем при применении полого шпинделя, но в условиях обработки в сплошном слое ТЖ этого вполне достаточно. Это подтверждено испытаниями данного устройства в лабораторных и производственных условиях применительно к модернизированным универсально заточным станкам мод. 3Д642Е (рис. 4.3, б условия эксперимента: круг 6 А2х150х20х5х32 АС6 200/160 100% М1-01;  $V_k = 20$  м/с;  $U = 15$ В; электролит 3%  $\text{NaNO}_3$ , 0,5%  $\text{NaNO}_2$ , остальное вода)

#### **4.3. Разработка кассетного приспособления для заточки лезвийных инструментов на плоскошлифовальных станках с вертикальным шпинделем**

Многоместное кассетное приспособление предназначено для базирования и дальнейшего закрепления резцовых вставок при их заточке на станках с вертикальным расположением шпинделя (*патент №91976, Украина*). Оно дает возможность реализации полного цикла заточки резцовых вставок в сплошном слое ТЖ и позволяет обеспечить высокую точность (идентичность) вставок в обрабатываемой партии (за одну установку), что особенно важно для использования их в автоматизированном производстве [34]. Устройство (рис. 4.4 – 4.6) содержит две полупризмы 1, 2, установленные на осях 3, 4 с возможностью поворота относительно корпуса 5, в верхней части которого выполнен продольный паз 6, смещенный в одну из сторон (в данном случае влево). При этом верхняя плоскость корпуса делится примерно пополам.

Паз служит для закрепления резцовых вставок 7 при заточке их задних поверхностей. Каждая из полупризм 1, 2 соединена с соответствующими поверхностями сменного клина 8. Благодаря этому они получают наклон в горизонтальной плоскости под передними углами вставок «- $\gamma$ » (установка на плоскость А) или «+ $\gamma$ » (установка на плоскость В) соответствующей величины. При установке приспособления на торцевую поверхность клина 7 передний угол  $\gamma$  равен нулю. На противоположной от паза стороне верхней части корпуса выполнена система отверстий для размещения резцовых вставок 6 при шлифовании на

них лысок и заточке их передних поверхностей. Для силового замыкания конструкции используется болт 9.

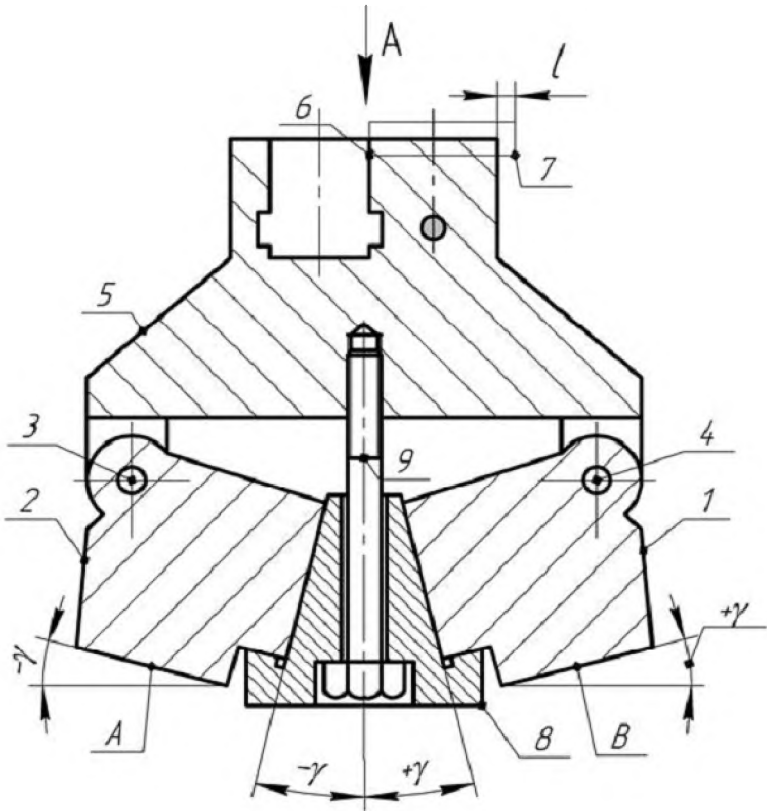


Рисунок 4.4 – Главный вид многоместного кассетного приспособления

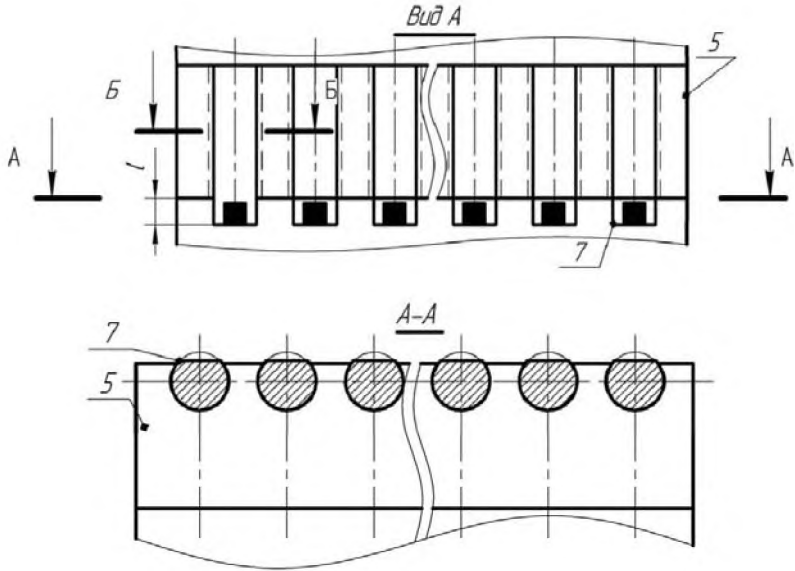


Рисунок 4.5 – Схема размещения резцовых вставок в отверстиях

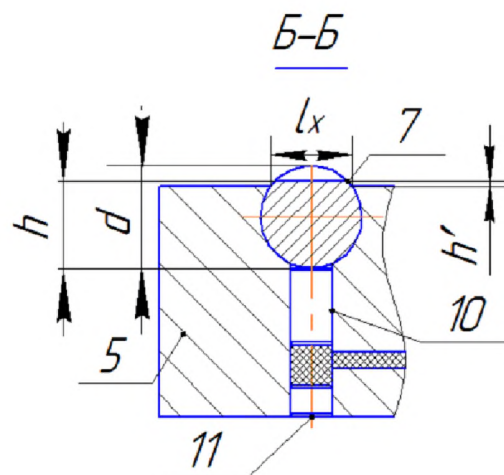


Рисунок 4.6 – Схема базирования и закрепления резцовой вставки в отверстии

На рис. 4.5 (вид сверху, рис. 4.4) показана схема размещения резцовых вставок в отверстиях. Оси этих отверстий выполнены перпендикулярно продольной оси паза. Вставки смещены в осевом направлении на величину  $l$ , примерно равную размеру их головок.

Это предотвращает повреждение корпуса приспособления шлифовальным кругом. Как видно из рис. 4.5 и 4.6, верхние части отверстий срезаны. При этом длина хорды  $L_x$  (рис. 5.6), образованной в результате пересечения верхней плоскости корпуса с каждым отверстием, должна находиться в определенных пределах, чтобы, с одной стороны, была создана возможность получения необходимой высоты вставок  $h$  при шлифовании лысок, а с другой – исключить возможность свободного выпадения вставок. Длина хорды, образованной в результате пересечения верхней плоскости корпуса с каждым отверстием, должна находиться в пределах:

$$d \cdot \sin(90 - \arcsin((2h - d - 2h')/d)) \leq L_x \leq d - 0,2, \quad (4.2)$$

где  $L_x$  – длина хорды, мм;  $d$  – диаметр вставки, подлежащей заточке, мм;  $h$  – высота вставки, мм;  $h'$  – гарантированная высота вылета вставки, равная 0,1 – 0,2 мм.

Дополнительная (гарантированная) величина выступления вставок  $h'$  служит для защиты корпуса от возможного повреждения шлифовальным

кругом ( $h' = 0,1-0,2$  мм). Таким образом, срезанная верхняя часть отверстий позволяет обеспечить полный доступ шлифовального круга для формообразования лысок и передних поверхностей лезвийных инструментов. В связи с этим зажимные элементы расположены снизу (рис. 4.6). В этом случае процесс зажима проводится плунжерами 10 с помощью, например, гидропласта. Заглушки 11 служат для создания условия герметичности системы зажима.

Пример расчета длины хорды при заточке резцовых вставок  $\varnothing 10$ , оснащенных ПСТМ марки эльбор-Р (на рис. 4.5 показано черной заливкой), алмазным торцевым кругом. Высота вставок по чертежу

$h = 7,5$  мм. Гарантированный размер  $h'$  был принят равным  $0,2$  мм. Длину хорд отверстий в кассете рассчитывали по формуле (4.2):

$$L_x = 10 \cdot \sin(90^\circ - \arcsin((2 \cdot 7,5 - 10 - 2 \cdot 0,2)/10)) \approx 8,9 \text{ мм.}$$

Принимаем  $L_x = 8,9$  мм.

Делаем проверку:  $L_x = d - 0,2 = 10 - 0,2 = 9,8$  мм. Таким образом, условие (4.2) выдерживается.

#### **4.4. Разработка способа шлифования сверхтвердых материалов торцевыми кругами**

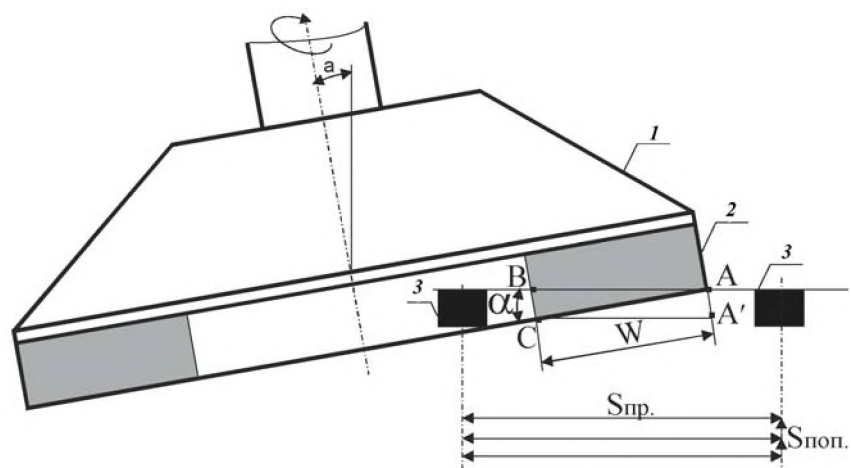
Как было отмечено выше, существенным недостатком традиционной схемы заточки лезвийных инструментов с ПСТМ (без предварительного наклона оси шпинделя) является то, что первым в работу вступает периферийная кромка РПК. То есть она является наиболее незащищенным и уязвимым элементом, что, как правило, приводит к повышенному «местному» износу и появлению так называемого переходного конуса. С другой стороны, например, при заточке лезвийных инструментов из ПСТМ, когда натяг в системе «станок – приспособление – инструмент (круг) – деталь» существенен, часто встречаются случаи врезания круга в участки вершины резца при его заточке, что неизбежно ведет к повышенному проценту бракованных изделий и порчи РПК. Глубинную схему обработки можно считать более рациональной как, например, при внутреннем шлифовании [39]. Для ее реализации необходимо изменить направление продольной подачи (см. раздел 2). Это дает возможность РПК

плавно входить в контакт с поверхностью детали, более равномерно изнашиваться, а значит, обеспечивать лучшие значения выходных показателей обработки. Кроме этого, шлифование по глубинной схеме в сочетании с наклоном круга (который является обязательным в данном случае) дает возможность в определенной степени управлять площадью контакта РПК с деталью, а следовательно, и термосиловой напряженностью процесса обработки в целом.

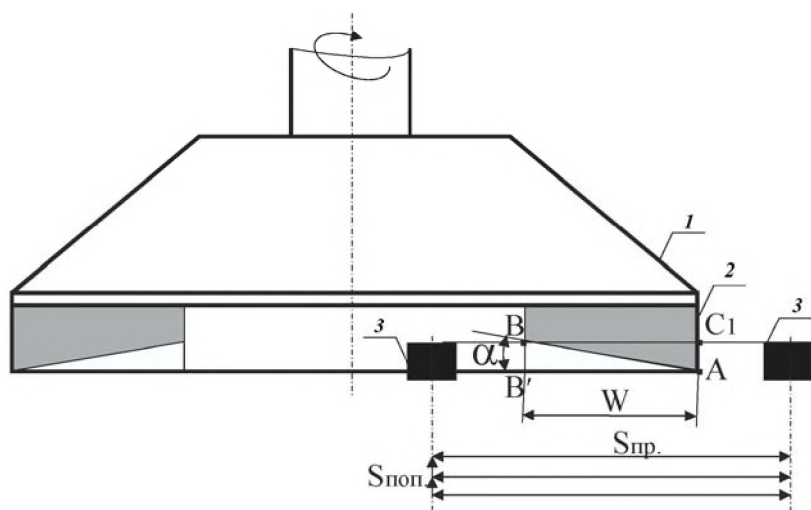
Практика шлифования деталей и заточки инструментов из ПСТМ позволила предложить новый подход к процессу заточки лезвийных инструментов алмазными торцевыми кругами (*патент № 76437, Украина*). Он базируется на рассмотренной выше идеи поворота круга при внутреннем глубинном [39] и плоском торцевом шлифовании [80], когда круг заранее наклоняют относительно направления продольной подачи так, чтобы образующая его рабочей поверхности располагалась относительно указанного направления под определенным начальным углом  $\alpha$ , а поперечную подачу осуществляют на двойной ход.

Новым в предложенном способе является то (рис. 4.7), что круг периодически возвращают в исходное положение, одновременно с этим место осуществления поперечной подачи смещают на противоположную сторону ширины рабочей поверхности круга, при этом в качестве критерия для изменения положения круга выбирают параллельность образующей его рабочей поверхности направлению продольной подачи, а начальную величину угла принимают в пределах  $\alpha = 2^\circ - 2,5^\circ$ .

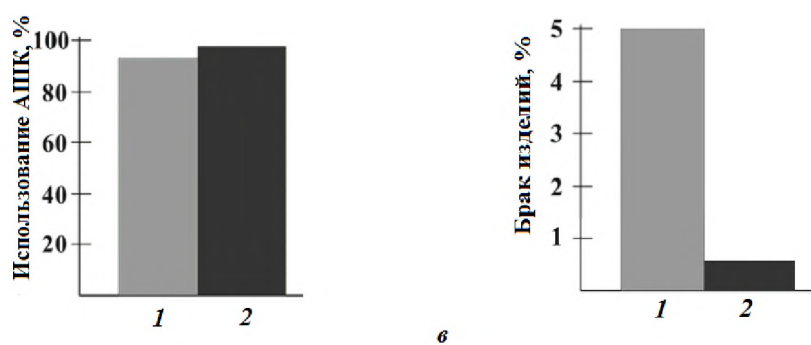
Суть способа объясняется рис. 4.6, на котором круг 1 с алмазоносным слоем 2 показан при шлифовании ПСТМ 3 в состоянии после поворота сначала на угол  $\alpha$  (рис. 4.7, а), а затем в исходное положение (рис. 5.7, б). После поворота на угол  $\alpha$  (рис. 4.7, а) и последующего шлифования ПСТМ РПК (шириной  $W$ ) изнашивается и в конце концов ее образующая АС переходит в положение АВ и становится параллельной (в макросмысле) по отношению к направлению продольной подачи. После этого круг 1 надо вернуть в прежнее положение. Как видно из рис. 4.7, б, при этом образующая АВ уже имеет наклон под углом  $\alpha$  благодаря износу РПК при предварительной обработке (рис. 4.7, а) по отношению к направлению продольной подачи.



*a*



*б*



*в*

Рисунок 4.7 – Графическая иллюстрация предложенного способа плоского торцевого шлифования (заточки) ПСТМ (*a*, *б*) и его показатели (*в*):

*1* – существующий способ;

*2* – предложенный способ

Но этот наклон обратный. Именно поэтому место осуществления поперечной подачи  $S_{\text{поп}}$  надо сместить на противоположную сторону ширины РПК. После того как образующая ВС/ станет параллельной по отношению к направлению продольной подачи, круг / снова наклоняют на угол  $\alpha$ . И таким образом процесс повторяют до практически полного износа алмазоносного слоя. Меньшее значение угла  $\alpha$  принимают для ПСТМ, имеющих большую микротвердость, и наоборот.

При этом учитывается, что чем больше микротвердость ПСТМ, тем меньшее значение поперечной подачи (глубина шлифования) используется. В начальный момент обработки размеры АА' и ВВ' могут значительно превышать значения поперечной подачи. Таким образом, обеспечивается плавное вхождение ОМ в контакт с РПК, пока образующая РПК не станет параллельной направлению продольной подачи.

При заточке лезвийных инструментов из ПСТМ желательно отдавать предпочтение алмазным кругам с большей шириной рабочей поверхности, что повышает жесткость технологической системы. Эксперименты показали, что предложенный способ шлифования позволяет увеличить примерно на 5 % полноту использования алмазоносного слоя круга.

Одновременно с этим отсутствует брак изделий по причине неблагоприятного врезания кромки круга в ПСТМ (рис. 4.7, в), которые, как известно, являются достаточно хрупкими материалами.

Поскольку по мере износа шлифовального круга на его рабочей поверхности образуется площадка износа, размер которой постоянно увеличивается, то этот факт можно использовать с конкретной целью. Например, при предварительной обработке для уменьшения тепловой напряженности шлифовальный круг можно возвращать в исходное положение при достижении площади его износа до определенного критического размера, который зависит от физико-механических свойств ОМ.

При чистовых стадиях обработки, наоборот, увеличивая площадь износа РПК, можно получать необходимые показатели качества поверхности. Таким образом, предложенный способ шлифования имеет достаточно широкие технологические возможности.

Следует отметить, что такой подход можно успешно осуществлять на станках как с горизонтальным, так и вертикальным расположением шпинделя, как при обработке со значительными, так и с малыми глубинами шлифования. Подчеркнем, что особую эффективность способ имеет при внедрении в производство применительно к заточке лезвийных инструментов из ПСТМ.

#### **4.5. Разработка конструкции плоскошлифовального станка с вертикальным шпинделем для реализации возможности управления параметрами зоны контакта РПК с деталью**

Проведенные исследования и практический опыт позволили выявить дополнительные возможности в плане совершенствования предложенного процесса плоского торцевого шлифования. Все они, так или иначе, базируются на идее улучшения условий снижения температуры в зоне обработки. Выделим несколько из них.

Во-первых, это создание теоретических основ для практической реализации управления площадью контакта РПК с деталью за счет предварительного наклона оси вращения шпинделя. Целесообразность такого подхода к решению проблемы снижения температуры известна [66], [80], [131].

Во-вторых, это обработка в сплошном слое ТЖ [114], что, как правило, требует использования специальных ванн. Такой подход способствует существенному снижению температуры в зоне резания и правки круга алмазным карандашом и повышает надежность этого процесса, поскольку даже в случае непредвиденного прекращения подачи ТЖ эта зона продолжает охлаждаться. Это также создает условия для минимизации затрат ТЖ, что является очень актуальным вопросом. Конечно, при обработке в сплошном слое ТЖ последняя будет загрязняться продуктами шлифования и правки круга. На черновых стадиях обработки это может играть положительную роль, поскольку как бы способствует увеличению ресурса абразивных зерен за счет дополнительного их использования. В то же время на чистовых этапах обработки это может ухудшать качество обработанной поверхности, что



следует считать недостатком. Поэтому такой процесс целесообразно вести с очищенной ТЖ, что требует создания ванны специальной конструкции.

В-третьих, это использование механических колебаний в зоне резания (особенно при обработке хрупких, например, сверхтвердых материалов [76]), что, как известно [64], [99], может значительно повысить эффективность процесса шлифования в основном за счет облегчения условий самозатачивания круга и пластической деформации при удалении обычных ОМ. Это требует разработки простых и надежных средств создания таких колебаний.

В-четвертых, это создание необходимых условий для повышения эффективности подачи ТЖ во внутреннюю полость торцевого круга, а следовательно, и в зоны шлифования и правки (например, в случае отсутствия у станка полого шпинделя).

В-пятых, это создание необходимых условий для повышения эффективности правки абразивных кругов алмазными карандашами (надежное охлаждение алмаза путем правки в сплошном слое ТЖ) и алмазных токопроводящих кругов, например, электрохимическим методом [24], [122].

Учет этих факторов и их полное или частичное сочетание в одной конструкции плоскошлифовального станка с вертикальным расположением шпинделя (а именно такая конструкция станка позволяет наиболее эффективно реализовать вышеперечисленные технические решения) может существенно повысить технологические возможности процесса торцевого шлифования в целом. На рис. 4.8 (вид сбоку) изображена принципиальная схема предложенного плоскошлифовального станка с прямоугольным столом (*патент №81400, Украина*), который совершает возвратно-поступательное перемещение с продольной подачей  $S_{пр}$  и периодической вертикальной подачей  $S_v$  (на глубину шлифования  $t$ ). Поскольку шлифование ведется «на проход», то поперечная подача  $S_{поп.}$  используется в данном случае для предварительной настройки станка. Как видно из рис. 4.8 на станине 1 станка размещен шпиндельный узел 2 с вертикальным шпинделем 3, на нижнем конце которого с помощью оправки установлен шлифовальный круг 4 (в данном случае торцевой алмазный круг на металлической связке).

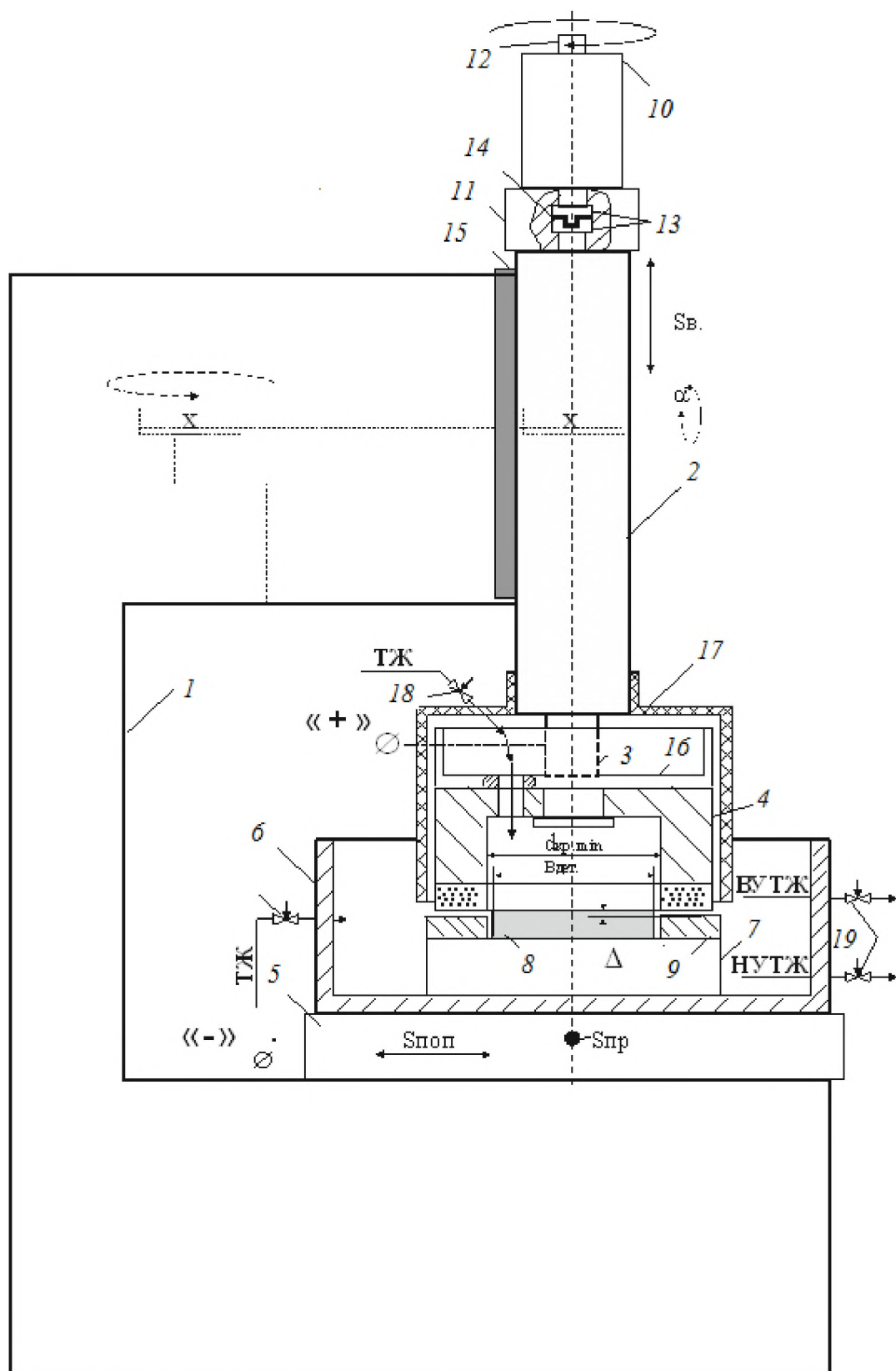


Рисунок 4.8 – Конструкция плоскошлифовального станка с вертикальным расположением шпинделя

Стол 5 станка обеспечен ванной 6, в которой находится приспособление 7 для обрабатываемых деталей 8 и катод 9 для электрохимической правки круга 4. Электродвигатель 10 с помощью фланца 11 соединен с верхней частью шпиндельного узла 2.

Вал 12 электродвигателя 10 и шпиндель 3 установлены соосно и соединены с помощью муфты 13 с упругим элементом 14. Муфта 13 состоит из двух полумуфт, причем полумуфта, размещенная на шпинделе, установлена с возможностью реализации или рабочего (например, предварительное вибрационное шлифование), или холостого хода в случае реализации чистового шлифования с передачей вращения на шпиндель от другого электродвигателя через ременную передачу (на схеме показано пунктиром).

Положительный полюс источника постоянного тока (на рисунке не показан) подключен к шпинделю 3, который вращается (с помощью токосъемника), а отрицательный полюс к столу 5 станка. Диэлектрическая пластина 15 между станиной 1 и шпиндельным узлом 2 позволяет электрически изолировать их друг от друга.

Поскольку вал 12 электродвигателя 10 и шпиндель 3 соединены непосредственно через муфту 13 (см. п. 4.1), а следовательно, подача ТЖ во внутреннюю полость круга через полый шпиндель 3 сопровождается определенными трудностями (или если шпиндель сплошной), то используется специальное устройство со стаканом 16 (см. п. 4.2). Резиновый кожух 17 устраняет возможное разбрызгивание ТЖ. Устройства 18 и 16 для подвода ТЖ обеспечивают ее подачу как непосредственно в ванну 6, так и во внутреннюю полость шлифовального круга 5. В последнем случае электропроводящая жидкость (электролит) под действием центробежных сил интенсивно прокачивается через зону шлифования, а также через межэлектродный зазор  $\Delta$ . Тем самым обеспечиваются оптимальные условия как для охлаждения зоны обработки, так и для нормального протекания электрохимического процесса правки круга.

Устройства 19 для слива ТЖ могут быть выполнены с возможностью ступенчатой или плавной регулировки ее уровня в ванне по отношению к уровню зоны шлифования, причем верхний уровень (ВУТЖ) служит для

реализации чернового, а нижний (НУТЖ) чистового этапов шлифования. Это связано с тем, что на чистовых операциях важно подавать в зону шлифования очищенную ТЖ, что и обеспечивается в случае, когда ее уровень в ванне находится ниже уровня зоны шлифования.

Необходимость выдерживания требования относительно значения ширины рабочей части приспособления объясняется следующим. При ширине ее участка, предназначенного для размещения обрабатываемых деталей, меньшей, чем внутренний диаметр круга ( $B \leq d_{\min}$ ), реализуется идея шлифования «на проход». Использование в этом случае катода-сепаратора [114] могло бы существенно усложнить возможность осуществления электрохимической правки алмазного круга на металлической связке при обработке токопроводящих деталей. Поэтому установка правящего катода на участке, прилегающем к периметру рабочей поверхности приспособления, обеспечивает необходимые условия для электрохимической правки рабочей поверхности круга, а также и при обработке токопроводящих деталей. При этом катод должен перекрывать РПК по всей ее ширине.

Шпиндельный узел установлен с возможностью реализации соответствующего поворота оси шпинделя на угол  $\alpha$  (рис. 4.8 – 4.9).

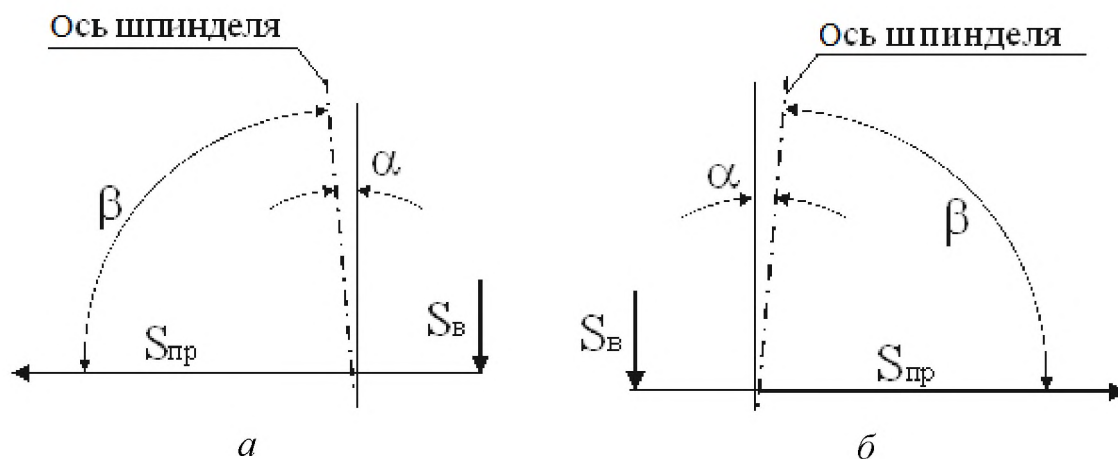


Рисунок 4.9 – Порядок осуществления  $S_e$  на двойной ход стола станка

Желательно, чтобы механизм поворота был достаточно точным. Это следует из данных, полученных в разделе (подраздел 2.1).



Наиболее рациональным вариантом обработки следует считать такой, когда вертикальная подача ( $S_v$ ) осуществляется на двойной ход стола станка, а величина угла  $\beta$  между вектором продольной подачи ( $S_{пр}$ ) стола и осью шпинделя не превышает  $90^\circ$  (рис. 4.9).

Станок может иметь также и вращающийся стол (рис. 4.10). Такие станки считаются наиболее производительными и тоже могут работать по двум схемам обработки: многопроходной или однопроходной. Ванна 7 в этом случае выполняется в виде емкости, поперечное сечение которой имеет форму кольца. Данный станок может с успехом применяться и при обычном алмазно-абразивном шлифовании. В данном случае используются традиционные ТЖ, а процесс обработки ведут при выключенном источнике постоянного тока. Правку РПК при этом надо выполнять в сплошном слое ТЖ. Для случая заточки лезвийных инструментов из сверхтвердых материалов на стол станка устанавливается специальное кассетное приспособление (см. п. 4.3.)

## Выводы

1. 3D-моделирование вибрационного процесса шлифования указало на возможность существенного повышения величины эквивалентных напряжений в зоне контакта РПК с деталью. Это положительно влияет на интенсивность самозатачивания алмазно-абразивных зерен круга, свидетельством чего является факт повышения производительности обработки. В связи с этим предложено конструкцию упругой муфты для создания произвольных колебаний в зоне обработки, которая позволяет существенно упростить в реальном производстве реализацию вибрационного процесса шлифования (*патент № 109911, Украина*).

2. Разработана прогрессивная конструкция устройства для подачи ТЖ в зоны шлифования и правки в виде сменной оправки со стаканом (*патент № 82805, Украина*). Новым является то, что устройство одновременно выполняет три функции: во-первых, оно служит для базирования и закрепления шлифовального круга; во-вторых, с его помощью круг механически связан со шпинделем станка; в-третьих, благодаря стакану и системе пазов устройство выполняет функцию доставки ТЖ во внутреннюю полость круга.

3. Предложенное многоместное кассетное приспособление предназначено для шлифования (заточки) резцовых вставок в сплошном слое ТЖ на плоскошлифовальных станках с вертикальным расположением шпинделя (*патент № 91976, Украина*). Оно дает возможность реализации полного цикла низкотемпературной заточки резцовых вставок и позволяет обеспечить их высокую точность (идентичность) в обработанной партии (за одну установку), что особенно важно при использовании их в современных автоматизированных производствах.

4. Предложен способ шлифования (заточки) ПСТМ, основанный на идее наклона оси шпинделя в горизонтальной плоскости с последующим периодическим поворотом в исходное положение, которое сопровождается одновременным изменением места осуществления поперечной подачи (*патент № 76437, Украина*). Это позволяет защитить кромку круга от чрезмерной нагрузки и снизить брак изделий при обработке. Эффективность способа повышается в случае совместного применения с предложенным многоместным кассетным приспособлением.

5. Разработана прогрессивная конструкция плоскошлифовального станка с вертикальным шпинделем (*патент № 81400, Украина*), которая учитывает возможность полного или частичного сочетания всех предложенных в работе технических решений, защищенных патентами на полезные модели. Эти усовершенствования способствуют существенному повышению технологических возможностей процесса плоского торцевого шлифования за счет снижения его теплонапряженности.

## Общие выводы

1. Установлено наличие имеющегося существенного противоречия между литературными рекомендациями по выбору угла предварительного наклона оси вращения шпинделя при реализации процесса плоского торцевого шлифования. Они отличаются от нескольких до десятка раз. В условиях предварительного наклона оси вращения шпинделя значительными технологическими возможностями обладает глубинная схема обработки, поскольку при неполном контакте РПК с деталью внешняя кромка круга получает защиту от образования заборного конуса, что делает процесс шлифования более стабильным и прогнозируемым.

2. Подтверждено, что предварительный наклон оси шпинделя позволяет в достаточно широких пределах управлять значениями параметров зоны контакта РПК с деталью. Установлено, что наиболее резкое изменение параметров имеет место в зоне малых значений углов ( $<0,25^\circ$ ). В таких условиях дополнительное влияние на параметры имеют диаметр круга, глубина обработки и ширина детали.

3. Для обеспечения технических требований по отклонению от плоскостности при реализации глубинной схемы обработки «на проход» нужно иметь четко определенную величину угла наклона оси шпинделя, причем с учетом того, что на отклонение формы плоской поверхности, кроме него влияют внешний диаметр торцевой круга, а также ширина обрабатываемой поверхности детали.

4. Дальнейшее решение проблемы уменьшения площади контакта РПК с деталью может быть связано с применением многопроходной схемы обработки (с использованием дополнительной поперечной подачи). Ключевым моментом при реализации многопроходной схемы обработки является согласованность между величинами поперечной подачи и ширины контакта РПК с деталью. Это дает возможность управлять значением высоты остаточных гребешков и не допускать появления на поверхности детали зон, не обработанных кругом.

5. Компьютерное геометрическое моделирование подтвердило корректность полученных аналитических зависимостей параметров зоны контакта РПК с деталью от условий реализации процесса шлифования и позволило предложить способы плоского торцевого шлифования,



основанные на определении условий шлифования с использованием предельных значений отклонения от плоскостности, остаточных гребешков и площади зоны контакта РПК с деталью.

6. Путем сочетания экспериментальных исследований и методологии 3D-моделирование системы «синтетический поликристаллический алмаз – металлофаза – металлическое покрытие» предложен комплексный подход к повышению ресурса алмазного правящего инструмента до уровня природных алмазов. Он заключается в использовании экспресс-метода оценки абразивной способности алмаза на предварительном этапе, выявленных рациональных условий высокотемпературного закрепления алмаза в державке инструмента и гарантированного обильного охлаждения алмаза в процессе правки круга в сплошном слое ТЖ.

7. На базе использования методологии 3D-компьютерного моделирования НДС системы «алмазное зерно – связка круга – ОМ» установлена возможность существенного повышения величины эквивалентных напряжений в случае наложения в зону контакта РПК с деталью произвольных механических колебаний. Это положительно влияет на интенсивность самозатачивания алмазно-абразивных зерен круга, свидетельством чего является факт повышения производительности обработки.

8. Предложен ряд технических решений, защищенных патентами на полезные модели, направленных на совершенствование условий снижения тепловой напряженности в зоне обработки. Они разработаны с возможностью частичного или полного объединения в предлагаемой конструкции плоскошлифовального станка с вертикальным расположением шпинделя. Это облегчает задачу внедрения этих технических решений в производство и способствует совершенствованию процесса плоского торцевого шлифования.

9. Результаты исследований могут быть частично использованы применительно к плоскому торцевому шлифованию с предварительным наклоном оси вращения шпинделя по обычной (не глубинной) схеме обработки, а также для условий процесса торцевого фрезерования с предварительным наклоном оси вращения шпинделя.

### Список литературы

1. Александров П. С. Лекции по аналитической геометрии / П. С. Александров. – М.: Главная редакция физ-матлитературы, 1968. – 911 с.
2. Алмазная обработка технической керамики / [Д. Б. Ваксер, В. А. Иванов, Н. В. Никитков, В. Б. Рабинович] – Л.: Машиностроение, 1976. – 160 с.
3. Антонюк В. С. Теплові явища при обробці різанням: Навч. посіб. / В. С. Антонюк, С. Ан. Клименко, С. А. Клименко. – Київ: НТУ України «КПІ», 2014. – 156 с.
4. А. с. 1627394 СССР. МПК<sup>5</sup> B24D 17/00 B24B 55/02. Торцовый шлифовальный круг / [И. И. Грабченко, И. Н. Пыжов, С. А. Култышев, Ю. В. Еременко] (СССР) – № 4639488/08; заявл. 14.12.88; опубл. 15.02.91, Бюл. № 6.
5. Бабенко Е. А. Повышение работоспособности алмазных кругов на полимерных и керамических связках: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Бабенко Евгений Александрович. – Харьков, 2014. – 203 с.
6. Байкалов А. К. Введение в теорию шлифования материалов / А. К. Байкалов. – Київ: Наукова думка, 1978. – 207 с.
7. Бакуль В. Н. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента: учеб. пособ. / [В. Н. Бакуль, Ю. И. Никитин, Е. Б. Верник, В. Ф. Селех]. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
8. Барбашин Е. А. Введение в теорию устойчивости / Е. А. Барбашин. – М.: Наука, 1967. – 223 с.
9. Лазерная резка материалов на основе алмаза и плотных модификаций нитрида бора / А. М. Блощаневич, А. В. Бочко, В. В. Пасичный, Я. Н. Филиппов // Порошковая металлургия, 2004. – № 3 – 4. – С. 47 – 54.
10. Валиев Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М.: Академкнига, 2007. – 397 с.

11. Вероман В. Ю. Электроалмазное шлифование / В. Ю. Вероман // В сб. Алмазные инструменты в машиностроении. – Л.: Лениздат, 1965. – С. 216 – 234.

12. Влияние металлизации на окисление синтетических поликристаллических материалов / К. К. Кудрявцев, Г. М. Страхова, М. А. Панченко // Сб. «Алмазы и сверхтвердые материалы», 1976. – Вып. 5. – С. 3 – 4.

13. Внуков Ю. Н. Исследование процесса высокопроизводительного электроабразивного шлифования быстрорежущих сталей кругами из дробленых поликристаллов: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструменты» / Ю. Н. Внуков. – Тбилиси, 1977. – 22 с.

14. Выгодский М. Я. Справочник по элементарной математике / М. Я. Выгодский. – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 509 с.

15. Высокопроизводительное электроалмазное шлифование инструментальных материалов / [М. Ф. Семко, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко и др.]. – Київ: Вища шк., 1979. – 232 с.

16. Гаврилов А. Н. Точность производства в машиностроении и приборостроении / А. Н. Гаврилов, Н. А. Бородачев, Р. М. Абдрашитов и др.; под ред. А. Н. Гаврилова. – М.: Машиностроение, 1973. – 567 с.

17. Грабченко А. И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / А. И. Грабченко. – Харьков: Вища шк., 1985. – 184 с.

18. Грабченко А. І. Комп'ютерне моделювання зони контакту торцевого круга з деталлю на плоскошліфувальних верстатах / А. І. Грабченко, І. М. Пижов, В. Г. Клименко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: Матеріали XI міжнар. наук. техн. конф. – Краматорськ: 2013. – С. 62.

19. Грабченко А. И. Моделирование процесса вибрационного алмазного шлифования / А. И. Грабченко, В. А. Федорович, С. С. Кронов, И. Н. Пижов, В. Г. Клименко // Научно-технические комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов: Сб. науч. трудов междунар. научно-техн. конф. – Ростов - на Дону: 2013. – С. 40 – 45.

20. Грабченко А. И. Повышение работоспособности правящих алмазных карандашей / А. И. Грабченко, И. Н. Пыжов, В. Г. Клименко // Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво) / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. –Полтава: ПолтНТУ, 2011. – Вип. 5 (35). – С. 3 – 9.

21. Грабченко А. І. Деякі шляхи удосконалення процесу плоского торцевого шліфування / А. І. Грабченко, І. М. Пижов, В. О. Федорович, В. Г. Клименко // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. - Вип. 9. – С. 63 – 73.

22. Грабченко А. И. Повышение режущей способности токопроводящих алмазных кругов в комбинированных процессах шлифования ПСТМ / А. И. Грабченко, И. Н. Пыжов, Д. М. Алексеенко // Вісник Сумського держ. ун. Серія «Технічні науки», 2011. – №1, Т. 1. – С. 105 – 116.

23. Грабченко А. И. 3D-моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования: учеб. пособ. / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 364 с.

24. Грабченко А. И. Расширение технологических возможностей процесса плоского торцевого шлифования / А. И. Грабченко, И. Н. Пыжов, В. Г. Клименко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – Вып. 81. – С. 64 – 75.

25. Грабченко А. И. Повышение эффективности обработки ПСТМ на основе использования явления периодичности процесса шлифования / А. И. Грабченко, Л. Г. Дюбнер, И. Н. Пыжов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. –Вып. 80. – С. 43 – 55.

26. Грабченко А. И. Особенности использования микропорошков алмаза в кругах на металлических связках / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович, И. Н. Пыжов // Зб. наук. праць «Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем» / Донбаська держ. машинобуд. академія. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – Вип. 27. –С. 3 – 11.

27. Грабченко А. И. Повышение эффективности процессов финишной обработки деталей ГТД из труднообрабатываемых материалов / А. И. Грабченко, В. А. Коваль, В. А. Федорович, И. Н. Пыжов, В. Г. Клименко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий //научн. журнал. – Харьков: Технолог. центр, 2013. – №3/12 (63). – С.63 – 68.

28. Гринь Г. И. Изучение процесса осаждения соединений марганца и никеля из водных растворов / Г. И. Гринь, П. А. Козуб, Е. А. Семенов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2004. – № 14. – С.18 – 21.

29. Джон Уокенбах. Excel 2013: профессиональное программирование на VBA = Excel 2013 Power Programming with VBA / Джон Уокенбах. – М.: «Диалектика», 2014. – 960 с.

30. Дружинин Н. К. Выборочное наблюдение и эксперимент (Общие логистические принципы организации) / Н. К. Дружинин – М.: Статистика, 1977. – 176с.

31. Евстигнеев А. Д. Повышение эффективности двустороннего шлифования тонкостенных заготовок путем формирования профиля рабочих поверхностей шлифовальных кругов: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки» / А. Д. Евстигнеев. – Ульяновск: – 2005. – 18 с.

32. Егоров М. Е. Технология машиностроения / М. Е. Егоров, В. И. Дементьев, В. Л. Дмитриев – М. : Машиностроение, 1976. – 535 с.

33. Ефимов В. В. Научные основы повышения технологической эффективности СОЖ на операциях шлифования: дис. докт. техн. наук: 05.02.08, 05.03.01 / Ефимов Владимир Васильевич. – Ульяновск: – 1988. – 440 с.

34. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвёрдыми и керамическими материалами, и их применение: Справочник / [В. П. Жедь, Г. В. Боровский, Я. А. Музыкант, П. М. Ипполитов]. - М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.

35. Журавлев В. В. Влияние термостойкости алмаза на стойкость инструмента / В. В. Журавлев, Н. И. Епишина // Алмазы и сверхтвёрдые материалы, 1982. – Вып. 3.– С. 3 – 6.

36. Зависимость абразивной способности синтетических алмазных агрегатов с микроструктурой карбонадо (АСПК) от их плотности. / [Л. Ф. Верещагин, Л. Е. Штеренберг, М. Я. Кац, Е. Ф. Долгопольская]: Сб. «Алмазы и сверхтвердые материалы», 1976. – Вып. 5. – С. 1 – 3.

37. Зайцев Г. Н. Алмазное шлифование керамики с наложением высокочастотных колебаний на стандартные чашечные круги / Г. Н. Зайцев // Алмазы и сверхтвердые материалы, 1980. – Вып. 3. – С. 13 – 14.

38. Залогов В. А. Исследование процесса высокопроизводительного электроалмазного шлифования инструментальных материалов кругами из АСБ: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.03.01. «Процессы механической обработки, станки и инструменты» / В. А. Залогов. – Харьков: – 1974. – 22 с.

39. Захаренко И. П. Алмазные инструменты и процессы обработки / И. П. Захаренко. – Київ: Техніка, 1980. – 213 с.

40. Зубаирова Л. Х. Технологическое обеспечение требуемой точности формы тонкостенных деталей при плоском торцовом планетарном шлифовании: дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Зубаирова Л. Х.. – Пермь: – 2014. – 167 с.

41. Иванова Т. Н. Повышение эффективности торцового алмазного шлифования пластин из труднообрабатываемых сталей на основе изменения температурно-силовых условий процесса: дис. докт. техн. наук: 05.02.08, 05.02.07 / Иванова Татьяна Николаевна. – Чайковский: – 2014. – 418 с.

42. Иванова Т. Н. Кинематика формообразования при торцовом планетарном шлифовании / Т. Н. Иванова // Известия Челябинского научного центра, 2006. – Вып. 1 (31). – С. 31 – 36.

43. Интегрированные процессы обработки материалов резанием: учебник [для высших учебных заведений] / [А. И. Грабченко, В. А. Залогов, Ю. Н. Внуков и др.]; под общ. ред. А. И. Грабченко и В. А. Залогов. – Сумы: Университетская книга, 2017. – 451 с.

44. Исаев А. И. Микрогеометрия поверхности при токарной обработке / А. И. Исаев. – М.: – Л.: Изд-во АН СССР, 1950. – 108 с.

45. Исследование зависимости абразивной способности алмазов марки АСБ от их микротвердости / [Н. З. Шишков, А. С. Семенова-Тян-Шанская, М. С. Пивоваров, А. И. Голенко]: Сб. «Алмазы», 1971. – Вып. 8. – С. 1 – 3.

46. Исследование износостойкости карандашей из природных и синтетических алмазов при правке шлифовальных кругов из эльбора / [Х. А. Ахундзянов, М. С. Друй, В. В. Авакян, А. Д. Перова, В. Б. Кудряшова]: Сб. «Алмазы», 1971. – Вып. 12. – С. 7 – 8.

47. Кадомцев С. Б. Аналитическая геометрия и линейная алгебра / С. Б. Кадомцев – М.-ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 160 с.

48. Калафатова Л. П. Технологічні основи підвищення ефективності обробки та забезпечення якості виробів із технічних стекл і ситалів: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.02.08 «Технологія машинобудування» / Л. П. Калафатова. – Харків: – 2001. – 35 с.

49. Кальченко В. И. Повышение производительности и точности шлифования со скрещающимися осями эльборового круга и ступенчатого валика / В. И. Кальченко, Н. Н. Погиба, Д. В. Кальченко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 80. – С. 131 – 141.

50. Кацев П. Г. Статистические методы исследования режущего инструмента / П. Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1974. – 231 с.

51. Киндрук М. КОМПАС-3D V10 на 100 % / М. Киндрук. – Питер: Санкт-Петербург, 2009. ISBN 978-5-388-00375-1. – 559 с.

52. Киселев Е. С. Научные основы и технология применения смазочно-охлаждающих технологических средств при механической обработке: сб. учебно-исследоват. лаб. работ / Е. С. Киселев, В. Н. Ковальногов. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – С. 50 – 55.

53. Киселев Е. С. Теплофизический анализ концентрированных операций шлифования / Е. С. Киселев, В. Н. Ковальногов. – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – 140 с.

54. Киселев Е. С. Теплофизика правки шлифовальных кругов с применением СОЖ / Е. С. Киселев – Ульяновск: УлГТУ, 2001. – 171 с.

55. Клименко С. А. Ранжирование инструментальных поликристаллических сверхтвёрдых материалов по износостойкости / С. А. Клименко // Сверхтвёрдые материалы, 2004. – №4. – С. 69 – 75.

56. Клименко В. Г. Вдосконалення процесу плоского торцевого шліфування / В. Г. Клименко, І. М. Пижов // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць.– Харків: НТУ «ХПІ», 2013. –Вип. 1 (23). – С 68 – 79.

57. Козакова Н. В. Определение рациональных характеристик алмазных кругов путем 3D-моделирования процессов их изготовления и шлифования сверхтвёрдых материалов: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Козакова Н. В. – Харьков, 2004. – 210 с.

58. Колкер Я. Д. Математический анализ точности механической обработки деталей / Я. Д. Колкер – Киев: Техника, 1976. – 200 с.

59. Королев А. В. Прогрессивные процессы правки шлифовальных кругов / А. В. Королев, Р. А. Березняк // Изд-во Саратов. ун-та, 1984. – 112 с.

60. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С. Н. Корчак – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.

61. Краснощек Ю. С. Работоспособность кругов при алмазно-искровом шлифовании твёрдых сплавов / Ю. С. Краснощек, М. Д. Узунян // Резание и инструмент. – Харьков: ХПИ, 1980. – Вып. 23. – С. 3 – 10.

62. Криворучко Д. В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залого; под общ. ред. В. А. Залого – Сумы: Университетская книга, 2012. – 450 с.

63. Кулакова И. И. Химический синтез алмаза и метастабильность / И. И. Кулакова, А. П. Руденко // Proc. 4<sup>th</sup> International Symposium on Diamond Film and Related Materials. Kharkov, 1999. – P 61 – 76.

64. Кумабэ Д. Вибрационное резание; пер. с яп. С. Л. Масленникова / под ред. И. И. Портнова, В. В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

65. Лавріненко В. І. Наукові основи шліфування інструментальних матеріалів із спрямованою зміною характеристик контактних поверхонь: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / В. І. Лавріненко. – Київ: 2000. – 35 с.



66. Латышев В. Н. Повышение эффективности СОЖ / В. Н. Латышев. – М.: Машиностроение, 1985. – 89 с.
67. Лоскутов В. В. Шлифовальные станки / В. В. Лоскутов. – М.: Машиностроение, 1976. – 191 с.
68. Лурье Г. Б. Шлифовальные станки и их наладка / Г. Б. Лурье., В. Н. Комиссаржевская. – М.: Высш. шк., 1972. – 416 с.
69. Магазеев М. Г. Повышение эффективности изготовления профильных инструментов из сверхтвердых и керамических материалов за счет сочетания электроэрозионной и алмазной обработки: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Магазеев Михаил Геннадиевич. – Харьков, 1997. – 204 с.
70. Мазур Н. П. Основы теории резания материалов: учебник для высш. учебн. заведений / [Н. П. Мазур, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко и др.] // под общ. ред. Н. П. Мазура и А. И. Грабченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.
71. Малышев В. И. Повышение эффективности скоростного шлифования за счет совершенствования правки абразивных кругов: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Малышев Владимир Ильич. – Тольятти, 1986. – 256 с.
72. Малышев В. И. Аналитическое исследование температур при правке шлифовального круга / В. И. Малышев // Вектор науки ТГУ, 2009. - № 6(9). – С. 14 – 25.
73. Маслов Е. Н. Основы теории шлифования металлов / Е. Н. Маслов – М.: Машгиз, 1951. – 179 с.
74. Маталин А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
75. Методы определения показателей качества никелевого покрытия / [Г. И. Гринь, П. А. Козуб, Л. В. Мухина, И. Н. Дробоног] // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – № 12. – С. 90 – 94.
76. Моделирование процесса вибрационного алмазного шлифования / А. И. Грабченко, В. А. Федорович, С. С. Кронов, И. Н. Пыжов, В. Г. Клименко // Наукоёмкие комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов: Сб. научн. трудов междунар. научно-техн. конф. – Ростов-на-Дону: 2013. – С. 40 – 45.

77. Музичка Д. Г. Підвищення ефективності шліфування твердих сплавів спрямованим обмеженням формозміни різальної поверхні шліфувальних кругів: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / Д. Г. Музичка. – Чернігів: – 2015. – 20 с.

78. Мухаринский Е. И. Основы технологии машиностроения / Е. И. Мухаринский, В. А. Горохов – Мн.: Выш. шк., 1997. – 423 с.

79. Надуваев В. В. Применение прогрессивных инструментальных материалов алмазов – СВ в машиностроении / В. В. Надуваев, Е. Н. Фролов, В. П. Лексиков // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XIII междунар. научно – технич. конф. в г. Севастополе 11 – 16 сентября 2006 г. В 5 – ти томах. – Донецк: ДонНТУ, 2006. -Т. 3. – С. 81 – 85.

80. Наерман М. С. Справочник молодого шлифовщика / М. С. Наерман. – М.: Высш. шк., 1985. – 207 с.

81. Наерман М. С. Алмазная правка шлифовальных кругов / М. С. Наерман, М. А. Лумельский, А. Н. Ильин: сб. «Алмазы и сверхтвердые материалы», 1972. – Вып. 12. – С. 12 – 21.

82. Наконечный Н. Ф. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования кругами на металлических связках: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Наконечный Н. Ф. – Харьков, 1984. – 215 с.

83. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения: учеб. пособ. / Б. М. Балоян, А. Г. Колмаков, М. И. Алымов и др. – М.: АгроПрессДизайн, 2007. – 102 с.

84. Нижник С. Н. Анализ путей снижения теплонапряженности процесса шлифования / С. Н. Нижник, М. А. Курин, А. П. Петренко // Авиационно – космическая техника и технология, 2012. – №1. (88). – С. 30 – 33.

85. Никифоров И. П. Оптимизация продольной подачи при плоском шлифовании конструкционной углеродистой стали / И. П. Никифоров, П. Н. Мальцев // Вестник ПсковГУ, серия «Экономические и технические науки», 2014. – Вып. 4. – С. 146 – 153.

86. Новиков Н. В. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов / Н. В. Новиков, А. Л. Майстренко, В. Н. Кулаковский – Київ: Наук. думка, 1993. – 220 с.

87. Новиков Ф. В. Теоретический анализ технологических возможностей уменьшения температуры резания при шлифовании / Ф. В. Новиков // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві, 2015. – Вип. 3(8). – С. 88 – 95.

88. Ординарцев И. А. Справочник инструментальщика / И. А. Ординарцев, Г. В. Филиппов, А. Н. Шевченко. – Машиностроение. Ленинг. отд-ние, 1987. – 846 с.

89. Основы теории резания материалов: учебник / Н. П. Мазур и др. ; ред. Н. П. Мазур, А. И. Грабченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.

90. Островерх Е. В. Тепловые явления и качество поверхностного слоя при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: автореф. дис. канд. техн. наук 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструменты» / Е. В. Островерх. – Київ: – 1986. – 17 с.

91. Пайка и металлизация сверхтвердых инструментальных материалов / Ю. В. Найдич, Г. А. Колесниченко, И. А. Лавриненко, Я. Ф. Моцак; под ред. Ю. В. Найдича. – Київ: Наукова думка, 1977. – 188 с.

92. Пат. 2162788 Российская Федерация, МПК В24В 55/02. Способ подачи смазочно-охлаждающей технологической смеси в зону шлифования / Степанов Ю. С., Афонасьев Б. И., Куценко С. А., Харламов Г. А., Подзолков М. Г.; патентообладатель и заявитель Орловский государственный технический университет. – № 99107768/02; заявл. 07.04.1999; опубл: 10.02.2001. Бюл. №4.

93. Пат. № 2385215 Российская Федерация, МПК В24В 55/02. Устройство для подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) при плоском торцовом шлифовании / [Гусев В. Г., Жигалов Р. В., Швагирев П. С.]; патентообладатель и заявитель ГОУВПО «Владимирский государственный университет». – № 2008129566/02; заявл. 17.07.2008; опубл: 27.03.2010. Бюл. №9.

94. Патент № 120068 Российская Федерация, МПК 6 F16D3/56. Упругая муфта / Егоров Е. И., Хованский В. В. . Заявка № 96123009/23; заявл. 03.12.1996; опубл. 10.10.1998. Бюл. №14.

95. Пат. 57966 Україна, МПК (2011.01) В23 В 25/00. Спосіб визначення допустимої швидкості різання при механічній обробці

субмікро- та нанокристалічних металів / Вerezub M. B., Simonova A. A., Kapтай Джордж, Севидова О. К. Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № u 201009836; заявл. 09.08.2010; опубл. 25.03.2011. Бюл. № 6.

96. Пат. 99265 Україна, МПК (2015.01) B24 B 53/00. Правильний інструмент / Севидова О. К., Пишов І. М., Гуцаленко Ю. Г., Степанова І. І. Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № u 201413480; заявл. 15.12.2014; опубл. 25.05.2015, бюл. № 10.

97. Петраков Ю. В. Моделирование процессов резания: учеб. пособ. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 240 с.

98. Планирование эксперимента в технике / В. И. Барабашук, Б. П. Креденцер, В. И. Мирошниченко / под редакцией Б. П. Креденцера. – Київ: Техніка, 1984. – 200 с.

99. Подураев В. Н. Обработка резанием с вибрациями / В. Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1970. – 350 с.

100. Полетика М. Ф. Приборы для измерения сил резания и крутящих моментов / М. Ф. Полетика. – М.: ГНТИ машиностр.лит-ры, 1963. – 109 с.

101. Польшаков В. І. Теоретичні і практичні основи високопродуктивного торцевого шліфування важкооброблюваних матеріалів: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.02.08 «Технологія машинобудування» / В. І. Польшаков. – Київ: – 1998. – 44 с.

102. Пишов І. М. До обґрунтування ефективності використання полікристалічних CVD-алмазів для правлячих інструментів / І. М., Пишов, В. Г. Клименко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – Вып. 82. – С. 91 – 98.

103. Пишов І. М. Перспективи застосування процесів шліфування матеріалів з нано- і субмікрокристалічною структурою / І. М. Пишов, В. Г. Клименко // «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво»: матеріали XII Всеукраїнської молодіж. наук.-техн. конф., присвяченої 90-річчю проф. Родіна П.Р. – 22 – 25 жовтня 2012 року. – Київ: 2012. – С. 48 – 51.

104. Пижов І. М. Дослідження особливостей формування відхилень від площинності при плоскому торцевому шліфуванні / І. М. Пижов, В. Г. Клименко // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: 2014. – Вип. 151/2014. – С. 134 – 139.

105. Пижов І. М. Деякі особливості багатопрохідного плоского торцевого шліфування / І. М. Пижов, В. Г. Клименко // Резание и инструмент в технолог. сист.: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2014. – Вып. 84. – С. 201 – 210.

106. Пижов І. М. Дослідження ширини контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя / І. М. Пижов, В. Г. Клименко // Журнал инженерных наук: наук. – Суми: Вид-во СумДУ, 2015. – Том 2. №1. – С. А10 – А15.

107. Пижов І. М. Дослідження площі контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з попереднім нахилом осі шпинделя / І. М. Пижов, В. Г. Клименко // Журнал инженерных наук: наук. – Суми: Вид-во СумДУ, 2015. – Том 2. №2. – С. А1 – А6.

108. Пижов І. М. Теоретичні дослідження формування залишкових гребінців при багатопрохідній схемі торцевого шліфування з нахилом осі шпинделя / І. М. Пижов, В. Г. Клименко: Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво) / Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. – Полтава: ПолтНТУ, 2016. – Вип.2(47). – С. 5 – 13.

109. Пижов І. М. Теоретичні дослідження лінійних параметрів зони контакту різальної поверхні круга із деталлю та увігнутості при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя / І. М. Пижов, В. Г. Клименко // Журнал инженерных наук. – Суми: Вид-во СумДУ, 2016. – Том 3. № 1. – С. А9 – А14.

110. Пижов І. М. Клименко В. Г. Теоретичні дослідження площі контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з попереднім нахилом осі шпинделя / І. М. Пижов, В. Г. Клименко // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків, НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 1(26). – С 69 – 80.

111. Подборнов И. В. Повышение эффективности и качества

чистовой обработки плоских поверхностей методом торцового планетарного шлифования: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.08 «Технология машиностроения» / И. В. Подборнов. – Пермь: – 2011. – 21 с.

112. Прогрессивные методы правки абразивных кругов / [В. Н. Малышев, В. И. Пилинский, Г. Г. Покладий и др.]; – К.: Техніка, 1985. – 112 с.

113. Пыжов И. Н. Состояние вопроса и перспективы применения алмазов, полученных методом CVD / И. Н. Пыжов, А. В. Васильев, В. Г. Клименко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 80. – С. 226 – 235.

114. Пыжов И. Н. Научные основы формообразования лезвийных инструментов из поликристаллических сверхтвердых материалов: дис. д-ра техн. наук: 05.03.01 / Пыжов Иван Николаевич. – Харьков, 2009. – 405 с.

115. Пыжов И. Н. 3D-моделирование напряженно-деформированного состояния при изготовлении алмазных карандашей / И. Н. Пыжов, В. А. Федорович, В. Г. Клименко // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПИ», 2016. – Вип. 11. – С. 56 – 63.

116. Резников А. Н. Теплофизика резания / А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.

117. Родин П. Р. Пути развития конструкций режущих инструментов / П. Р. Родин, Равская Н. С. // Высокие технологии в машиностроении. – Харьков: ХПИ, 1992. – С. 67 – 68.

118. Родин П. Р. Металлорежущие инструменты / П. Р. Родин: учебник для вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. – Київ: Вища школа, 1986. – 455 с.

119. Руденко А. П. Химический синтез алмаза. Аспекты общей теории / А. П. Руденко, И. И. Кулакова, В. Л. Скворцова // Успехи химии. – М: 1993. -Т. 62. № 2. – С. 99 – 117.

120. «Наука и образование». Научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/606036.html>.

121. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд; (пер. с англ. канд. физ.-мат. наук. А. А. Шестакова). М.: Мир, 1979. – 392 с.
122. Семко М. Ф. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, М. Г. Ходоревский. – Харьков: Вища шк., 1980. – 192 с.
123. Семко М.Ф. Экономическое обоснование выбора алмазного круга / М. Ф. Семко, М. Д. Узунян, Юфа Э. П. – Харьков: Изд-во «Прапор», 1971. – 100 с.
124. Сизый Ю. А. Основы научных исследований в технологии машиностроения: учебн. пособие / Ю. А., Сизый, Д. В. Сталинский. – Харьков: УкрГНТЦ «Енергосталь», «Издательство САГА», 2007. – 212 с.
125. Силин С. С. Оптимизация технологии глубинного шлифования / С. С. Силин, Б. Н. Леонов, В. А. Хрульков. М.: Машиностроение, 1989. – 120 с.
126. Симонова А. А. Определение рациональных параметров лезвийной обработки субмикроструктурных металлов для сохранения исходных свойств заготовок: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Симонова Анастасия Андреевна. – Харьков, 2010. – 211 с.
127. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В. А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
128. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием / под общ. ред. С. Г. Энтелеса, Э. М. Берлинера. 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.
129. Солонин И. С. Математическая статистика в технологии машиностроения / И. С. Солонин. – М.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
130. Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента: под общ.ред. Бакуля В. Н. – Киев: Техника, 1971, – 208 с.
131. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – 5-е изд., исправл. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 912 с.

132. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – 5-е изд., исправл. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 944 с.
133. Старков В К . Шлифование высокопористыми кругами / В К Старков. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
134. Степанов Ю. Н. Разработка и исследование процесса плоского торцевого планетарного шлифования: дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Степанов Ю. Н. – Пермь, 2000. – 254 с.
135. Степанов М. С. Математическое моделирование силы резания при шлифовании в различных условиях / М. С. Степанов, С. М. Шевченко // Вісник НТУ «ХПІ»: Зб. наук. праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – №2. – С. 212 – 218.
136. Схиртладзе А. Г. Станочник широкого профиля / А. Г. Схиртладзе, В. Ю. Новиков. – М.: Высш. шк., 2007. – 464 с.
137. Телегін О. В. Підвищення ефективності процесу плоского торцевого шліфування важкооброблювальних матеріалів за рахунок кінематики : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / О. В. Телегін . – Харків., 2009. – 20 с.
138. Тику Ш. Эффективная работа: Solidworks 2004 / Ш. Тику – СПб.: Питер, 2005. – 768 с.
139. Тюхта А. В. Повышение эффективности плоского шлифования периферией круга за счет совершенствования техники подачи СОЖ: дис. канд. тех. наук: 05.02.07 / Тюхта А.В. – Орел, 2013. – 131 с.
140. Узунян М. Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов / М. Д. Узунян. – Харьков: НТУ «ХПУ», 2003. – 359 с.
141. Федорович В. А. Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспособляемостью при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: дис. д-ра техн. наук: 05.03.01 / Федорович В. А. – Харьков, 2002. – 466 с.
142. Федорович В.А. 3D-моделирование вибрационного алмазного шлифования / В.А. Федорович, И.Н. Пыжов, С.С. Кронов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.– Харьков: 2013.- Вып. 83.-С. 269-276.



143. Фесенко А. В. Повышение эффективности шлифования при активации и рациональном использовании СОЖ / А. В. Фесенко, Ю. Н. Любимый // Вестник Сумского государственного университета. – Серия «Технические науки», 2010. – № 3. – С. 71 – 100.

144. Филимонов Л. Н. Плоское шлифование / Л. Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1985. – 109 с.

145. Формулы, интерактивный справочник по математике, геометрии, физике [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.fxyz.ru/>.

146. Хрульков В. А. Алмазные инструменты в прецизионном приборостроении / В. А. Хрульков, А. Я. Головань, А. И. Федотов. – М.: Машиностроение, 1977. – 223 с.

147. Худобин Л. В. Эффективность применения техники подачи СОЖ при совмещенном шлифовании / Л. В. Худобин, Е. С. Киселев, А. Н. Унянин // Вестник машиностроения, 1987. – № 7. – С. 64 – 67.

148. Худобин Л. В. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке / Л. В. Худобин, Е. Г. Бердичевский. М.: Машиностроение, 1977. – 189 с.

149. Худобин Л. В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / Л. В. Худобин, А. П. Бабичев, Е. М. Булыжев; под общ. ред. Л. В. Худобина. М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.

150. Худобин Л. В. Смазочно-охлаждающие средства, применяемые при шлифовании / Л. В. Худобин. М.: Машиностроение, 1971. – 214 с.

151. Швагирев П. С. Разработка и исследование инструмента и процесса плоского торцового шлифования дискретными абразивными сегментами: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» / П. С. Швагирев. – Владимир: – 2011. – 18 с.

152. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.valve-industry.ru/pdf\\_site/73/73-Kochanov.pdf](http://www.valve-industry.ru/pdf_site/73/73-Kochanov.pdf).

153. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.junker-group.com>.

154. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.intech-diamond.com/cvd-almaz.html>.
155. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://poltavadiamond.com.ua/ru/site/tool/karandash/kara\\_special](http://poltavadiamond.com.ua/ru/site/tool/karandash/kara_special).
156. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.drkaiser.de](http://www.drkaiser.de).
157. Якимов А. В. Прерывистое шлифование / А. В. Якимов. Киев – Одесса: Вища шк., 1986. – 176 с.
158. Якимов А. В. Теплофизика механической обработки / А. В. Якимов, П. Т. Слободяник, А. В. Усов. – Київ, Одесса: Лыбидь, 1991. – 240 с.
159. Ящерицын П. И. Основы резания материалов и режущий инструмент / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Н. И. Жигалко. – Минск: Вышэйшая школа, 1981. – 560 с.
160. Ящерицын П. И. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев. – Минск: «Наука и техника», 1972. – 480 с.
161. Audi schlichtet GJV-Zylinderbohrungen mit PKD. [http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2003\\_2/05\\_art/Art05\\_02\\_03.htm](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2003_2/05_art/Art05_02_03.htm).
162. Bil H., Tekkaya A. E., Kiliç E. S. (2005). 2D Finite Element Modeling of Machining: A Comparison of Different Approaches with Experiments, VIII International Conference on Computational Plasticity, CIMNE, Available at <http://congress.cimne.com/complas05/admin/files/filepaper/p176.pdf>, Barcelona.
163. Changsheng G., Stephen M. Thermal Analysis of Grinding. Annals of the CIRP, Vol. 56, 2007.
164. Damlos H. H. Profilschleifen im pendel und tiefschleif // Schleifen, Honen. Lappen und Polieren. Verfahren und Maschinen / E. Salje, Jahrb. 51 Ausg. Essen: Vuklan. Verlag, 1982. – S. 203 – 212.
165. Fritz Clocke. Manufacturing Processes 2 Grinding, Honing, Lapping / Fritz Clocke. – Berlin: Springer, 2009. – 433 p.
166. Gittel H.-J. Schneidstoffe in der holzbearbeitenden Industrie. [http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2003\\_2/15\\_art/Art15\\_02\\_03.htm](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2003_2/15_art/Art15_02_03.htm).

167. Grabchenko A., Fedorovich V., Pyzhov I., Fadee V., Babenko E., Klimenko V. Simulation of Grinding Process of Polycrystalline Superhard Materials // Key Engineering Materials Vol. 581 (2014) pp 217 – 223.

168. Huang J. M. An Evaluation of Chip Separation Criteria for the FEM Simulation of Machining / J. M. Huang, J. T. Black // of Manuf. Science and Engineering: Trans. of ASME. – 1996. – T. 118, № 4. – P. 545 – 554.

169. Introduction to Nanoscience / G. Hornyak, J. Dutta, H. Tibbals, A. Rao. – N.Y.: CRC Press, 2008. – 815 p.

170. Yo N. E., Peace T. R. A. Some observation on profile wear in creep feed grinding // Wear, 1983. Vol. 92. P. 51 - 66.

171. König W. Technische Keramiken funkenerosiv bearbeiten / König W., Panten U., Dauw D., Levy G. // Werkslaff und Belrieb. – 1989. – 122. – №8, – S. 665 – 668.

172. Kundrák J., Fedorovich V., Pyzhov I., Markopoulos A., Klimenko V. Some Features of the Surface Micro- and Macroprofile Formation at Flat Face Grinding with Spindle Axis Inclination / Applied Mechanics and Materials, Vols. 809 – 810 (2015), pp. 45 – 50, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.45, Trans Tech Publications, Switzerland.

173. Mamalis A. G, Kundrak J, Markopoulos A, et al. (2008). On the finite element modelling of high speed hard turning, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume: 38 Issue: 5 – 6 pp. 441 – 446 DOI: 10.1007/s00170-007-1114-9.

174. Mamalis, A. G., Grabchenko A. I., Fedorovich V. A., Kundrak J. (2012). Simulation of effects of metal phase in a diamond grain and bonding type on temperature in diamond grinding, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 58, Issue:1 – 4, pp. 195 – 200 DOI: 10.1007/s00170-011-3382-7

175. Peiqi G., Jianhua Z., Tien-Chien J., Lei Z. Study on the Coolant Supply Method in Grind-Hardening. Published in the Transactions of NAMRI/SME, Vol. 36, 2008 – P. 349 – 355.

176. Sen P. K. Synthetische Diamant-Abrichtrohlinge für den zukunfftigen Industriebedarf. [http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2002\\_2/16\\_art/art16\\_2\\_02.htm](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2002_2/16_art/art16_2_02.htm).

177. Stephen Malkin, Uppiliappan Sridharan. Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) with Nanofluids on Grinding Behavior and Thermal Distortion. Published in the Transactions of NAMRI/SME, Vol. 37, 2009. P. 629 –636.

178. Uhlmann E.; Wörner E.; Brücher M. Leistungsfähigere Zerspanprozesse durch die wärmespreizende Wirkung von CVD-Diamant?  
[http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2002\\_2/07\\_art/art07\\_2\\_02.htm](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2002_2/07_art/art07_2_02.htm).

179. Uhlmann E.; Brücher M. Marktanalyse zu CVD-Diamantwerkzeugen  
[http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2002\\_1/15\\_art/art15\\_1\\_02.htm](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2002_1/15_art/art15_1_02.htm).

180. Verkerk J., Pekelharing A. J. The influence of dressing operation on productivity in precision grinding // CIRP Ann., 1979. Vol.28. P. 487 – 495.

181. Yan, Q. S. (2003) / Q. S. Yan, Z. Q. Zhang, K. Syoji. Machining precision in the face grinding of a groove bottom using a CUP quill, Journal of Material Processing Technology 138, 527 – 530.

182. Zaghbani I. A thermo-mechanical coupled f.e.m model for orthogonal cutting / I. Zaghbani, W. Bouzud, K. Saï // Proceedings of the 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. – 2005. – P. 139 – 145

Наукове видання

ПИЖОВ Іван Миколайович  
КЛИМЕНКО Віталій Григорович

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЛОСКОГО ТОРЦЕВОГО  
ШЛІФУВАННЯ**

Монографія

Російською мовою

Відповідальний за випуск В.О. Федорович  
Роботу до видання рекомендував О.М. Шелковий

Редактор О.С. Самініна

План 2018 р., поз. 77

Підп. до друку 2018 р. Формат 60х84 1/16. Папір офсетний.  
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 9,0  
Наклад 100 прим. Зам. № Ціна договірна

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ».  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.  
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

---

Друкарня НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2